

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2012/2013

**Análise dos problemas associados ao destino final de
lamas em ETARs e desenvolvimento
de metodologias para otimização dos processos utilizados**

Flávio João Costa Moreira

Dissertação submetida para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Presidente do Júri: Manuel Fernando Ribeiro Pereira
Professor Associado do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto)

Orientador académico: Cheng Chia Yau
Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto)

julho de 2013

Agradecimentos

A realização desta dissertação não seria possível sem a ajuda de algumas pessoas a quem eu presto o meu mais sincero agradecimento.

À minha família, em especial aos meus pais pelo apoio incondicional a todos os níveis e pelos valores que me transmitiram, que representaram o maior contributo para a conclusão desta etapa.

Ao meu irmão pela companhia e ajuda ao longo destes meses de trabalho.

À Sara pela paciência e conselhos que foram muito importantes.

Aos meus amigos de sempre, em especial ao João Filipe e ao Luís pelo tempo despendido para tornarem o meu trabalho melhor.

Aos amigos de curso que me acompanharam ao longo destes 5 anos na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

À Eng^a. Assunção Abreu pela bibliografia fornecida e pela disponibilidade, simpatia e sabedoria transmitida.

Por fim, deixo um agradecimento muito especial ao Dr. Cheng, meu orientador e por quem tenho uma enorme admiração, pela disponibilidade e por todo o apoio que me deu ao longo deste semestre, permitindo que no fim desta etapa me sinta orgulhoso do trabalho realizado.

Resumo

Entre as práticas de destino final das lamas resultantes de tratamento de águas residuais urbanas, a valorização agrícola representa a opção mais utilizada a nível nacional, no entanto, ainda são enviadas quantidades significativas para aterros sanitários. A incineração pode representar uma alternativa de valorização para as lamas que não reúnam as condições necessárias para serem utilizadas na agricultura, contudo, em Portugal, esta opção ainda não é utilizada no tratamento de lamas.

A compostagem, quando bem realizada, permite a produção de um composto com um elevado teor fertilizante, permitindo contornar a contestação social associada à valorização agrícola direta das lamas produzidas em ETARs. A comercialização do composto produzido pode trazer vantagens económicas muito significativas, no entanto, as necessidades de arejamento nos processos de compostagem implicam consumos energéticos relativamente elevados, aumentando assim as emissões de GEE relativas a esta prática.

O teor de humidade das lamas desidratadas não permite que estas sejam incineradas sem a utilização de um combustível auxiliar, impedindo desde logo a produção de energia por esta via. Uma alternativa para a redução do teor de humidade passa pela secagem térmica das lamas, no entanto, este processo está associado a elevados consumos energéticos. A utilização de energia térmica, produzida na combustão do biogás numa caldeira, para a secagem térmica das lamas, permite teores de sólidos superiores a 50%, no entanto, esta opção inviabiliza a produção de energia elétrica num sistema de cogeração.

As lamas são classificadas como resíduos não perigosos, existindo a possibilidade de se recorrer a sistemas integrados, de tratamento conjunto com RSU. Esta hipótese pode representar uma solução vantajosa para as entidades envolvidas, devendo portanto estar sujeita a estudos rigorosos sobre a possibilidade de implementar estes sistemas a grande escala.

A metodologia apresentada forneceu um instrumento importante para a elaboração de um modelo conceptual de gestão das lamas produzidas em ETARs, procurando acompanhar o desenvolvimento tecnológico e normativo a curto/médio prazo. No entanto, as análises comparativas estão sujeitas a fatores de incerteza que devem ser cuidadosamente estudados para os diferentes casos em estudo.

Abstract

Among the practices of sewage sludge disposal resulting from the treatment of urban wastewater, land application is the option most used nationwide although significant amounts are still sent to landfills. Even though incineration could represent a valid alternative to the land application, bringing value for sludge that does not meet the requirements needed for being used in agriculture, this operation is seldom used in Portugal.

When properly done, composting produces biosolids with high fertilizer content, making possible to circumvent social contestation linked to the land application of sewage sludge generated in the WWTP. In addition, commercialization of biosolids can bring significant economical benefits. Nevertheless, the required aeration of the composting processes implies high energy consumption and increasing the GHG emissions related to this practice.

The moisture content of the dewatered sludge does not allow it to be incinerated without an auxiliary fuel, reducing energy production through this process. An alternative to mitigate the moisture content consists of the sludge is thermal drying, which obviously involves high energy consumption. The use of thermal energy produced in the biogas combustion for drying sludge enables solids contents to exceed 50%. However, this option prevents the production of electricity in a cogeneration system, once all the energy is consumed in the drying system.

Sludge is classified as non-hazardous waste, with the possibility of integrated treatment systems together with MSW. This option can represent an advantageous solution to the involved stakeholders, and therefore should be subject to rigorous studies to implement these systems on a large scale.

The presented methodology serves as an important tool for the development of a conceptual model for the management of sewage sludge produced in WWTP, following the technological and legislative development in the short/medium term. However, since comparative analyses are subject to uncertainty factors, it should be emphasized that these factors must be carefully evaluated for different case studies.

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract.....	iv
Índice	v
Índice de figuras	viii
Índice de tabelas.....	ix
Lista de abreviaturas.....	xi
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Legislação	3
1.4 Pesquisa de Informação.....	4
1.5 Estrutura da dissertação.....	5
2 Energia nas ETARs	6
3 Sistemas de tratamento de lamas.....	9
3.1 Tratamento preliminar.....	9
3.2 Espessamento.....	10
3.3 Estabilização	12
3.4 Desidratação	13
3.5 Secagem térmica	15
4 Tratamento Biológico de Lamas.....	16
4.1 Digestão Anaeróbia	16
4.2 Arejamento Prolongado.....	18
4.3 Compostagem	19
4.4 Vermicompostagem.....	21
5 Opções de destino final de lamas.....	22

5.1	Valorização agrícola	22
5.2	Incineração.....	24
5.3	Deposição em aterro	27
6	Metodologia	28
7	Caraterização da ETAR em estudo.....	30
7.1	Descrição	30
7.2	Produção de lamas.....	31
7.3	Balanço Energético	35
8	Simulação de Cenários para o destino final das Lamas produzidas	41
8.1	Cenário 1	41
8.1.1	Descrição	41
8.1.2	Estabilização química das lamas	41
8.1.3	Custos	42
8.1.4	Emissões de GEE.....	44
8.2	Cenário 2	46
8.2.1	Descrição	46
8.2.2	Custos	47
8.2.3	Emissões de GEE.....	48
8.3	Cenário 3	51
8.3.1	Descrição	51
8.3.2	Dimensionamento da Central de Compostagem	51
8.3.3	Custos	57
8.3.4	Emissões de GEE.....	58
8.4	Cenário 4	60
8.4.1	Descrição	60
8.4.2	Secagem térmica das lamas.....	61
8.4.3	Incineração.....	62
8.4.4	Custos	66
8.4.5	Emissões de GEE.....	67

9	Comparação dos cenários propostos	70
9.1	Custos	70
9.2	Emissões de GEE.....	72
9.3	Aceitação social	73
10	Conclusão.....	75
	Referências Bibliográficas.....	77

Índice de figuras

<i>Figura 1 - Evolução da dependência energética externa da UE e de Portugal</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2 - Evolução do preço da energia para indústrias em Portugal</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3 - Espessador gravítico na ETAR do Febros (adaptado de Águas de Gaia)</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4 - Mesas de espessamento (adaptado de ANDRITZ)</i>	<i>11</i>
<i>Figura 5 - Leitos de secagem de lamas (adaptado de DMC Contracting)</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6 - Filtro de banda para desidratação de lamas (adaptado de HUBER)</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7 - Centrifuga para desidratação de lamas (adaptado de ANDRITZ)</i>	<i>14</i>
<i>Figura 8 - Sistema de secagem térmica de lamas em Clos de Hilde, França (adaptado de ANDRITZ)</i>	<i>15</i>
<i>Figura 9 - Gasómetro e digestores anaeróbios na ETAR Barreiro/Moita (adaptado de SIMARSUL)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 10 - Sistema de Cogeração de energia (adaptado de Cheng)</i>	<i>18</i>
<i>Figura 11 - Central de compostagem de lamas na ETAR de Parada (adaptado de SMEAS Maia)</i>	<i>20</i>
<i>Figura 12 - Central de compostagem de lamas e resíduos no Canadá (adaptado de City of Edmonton)</i>	<i>20</i>
<i>Figura 13 - Valorização agrícola de lamas (adaptado de Bioblog)</i>	<i>23</i>
<i>Figura 14 - Sistema de incineração de lamas (adaptado de Degrémont)</i>	<i>26</i>
<i>Figura 15 - Deposição de lamas em aterro sanitário (adaptado de VCSTAR)</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16 - Esquema de tratamento da fase líquida e da fase sólida na ETAR em estudo</i>	<i>30</i>
<i>Figura 17 - Valorização do biogás num sistema de cogeração</i>	<i>39</i>
<i>Figura 18 - Valorização térmica do biogás numa caldeira</i>	<i>39</i>
<i>Figura 19 - Equipamentos necessários para a estabilização química das lamas</i>	<i>43</i>
<i>Figura 20 - Central de Valorização Orgânica da Lipor (adaptado de Lipor)</i>	<i>46</i>
<i>Figura 21 - Esquema de funcionamento da central de compostagem dimensionada</i>	<i>56</i>
<i>Figura 22 - Central de incineração da Lipor (adaptado de Lipor)</i>	<i>60</i>
<i>Figura 23 - Comparação dos custos totais nos diferentes cenários propostos</i>	<i>70</i>
<i>Figura 24 - Comparação das emissões de GEE nos diferentes cenários propostos</i>	<i>72</i>

Índice de tabelas

<i>Tabela 1 - Comparação entre o teor de nutrientes nos fertilizantes comerciais e nas lamas (adaptado de Metcalf&Eddy , 1991)</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 2 - Dados base da ETAR em estudo e do efluente a tratar.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 3 - Produção de lamas primárias na ETAR.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 4 - Produção de lamas secundárias na ETAR</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 5 - Espessamento gravítico das lamas primárias</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 6 - Mesas de espessamento para o tratamento das lamas secundárias.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 7 - Digestão anaeróbia das lamas mistas</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 8 - Desidratação das lamas digeridas em filtros banda.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 9 - Consumos de energia nos sistemas de espessamento e desidratação de lamas</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 10 - Dados do processo de digestão anaeróbia e dimensionamento dos digestores</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 11 - Cálculo das necessidades energéticas para o funcionamento dos digestores</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 12 - Cálculo da energia disponível no biogás produzido na digestão anaeróbia das lamas.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 13 - Produção de energia elétrica e energia térmica no sistema de cogeração.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 14 - Produção de energia térmica no sistema de combustão do biogás em caldeira</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 15 - Estabilização química das lamas desidratadas</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 16 - Custos relativos ao cenário 1</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 17 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao consumo de energia elétrica na estabilização química das lamas</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 18 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte das lamas para os terrenos de deposição final ..</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 19 - Custos relativos ao cenário 2</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 20 - Cálculo da produção de composto e políticas de comercialização adotadas.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 21 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte das lamas para a central de compostagem</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 22 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao consumo de energia elétrica na central de compostagem...</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 23 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte do composto a granel até aos consumidores finais</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 24 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte do composto ensacado até aos consumidores finais.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 25 - Caracterização das lamas desidratadas produzidas na ETAR</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 26 - Caracterização do material estruturante utilizado na compostagem das lamas</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 27 - Cálculo do volume diário de material a tratar na central de compostagem.....</i>	<i>53</i>

<i>Tabela 28 - Cálculo da área necessária para o armazenamento das lamas desidratadas e do material estruturante</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 29 - Cálculo da área necessária para a fase de degradação ativa das lamas</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 30 - Cálculo da área necessária para maturação do composto produzido</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 31 - Áreas complementares da central de compostagem</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 32 - Custos relativos ao cenário 3</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 33 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao consumo de energia elétrica na central de compostagem...</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 34 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte do composto a granel até aos consumidores finais</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 35 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte do composto ensacado até aos consumidores finais.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 36 - Propriedades das lamas desidratadas e energia disponível nas duas opções de valorização do biogás .</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 37 - Produção de lamas após a secagem térmica, utilizando o calor disponível do processo de cogeração .</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 38 - Produção de lamas após a secagem térmica, utilizando o calor resultante da combustão do biogás em caldeira.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 39 - Composição aproximada das lamas a incinerar</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 40 - Cálculo do poder calorífico superior das lamas</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 41 - Cálculo das perdas relativas ao ar adicionado para a combustão completa das lamas.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 42 - Cálculo das perdas relativas à humidade presente nas lamas</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 43 - Cálculo das perdas relativas à água produzida na combustão das lamas.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 44 - Custos relativos ao cenário 4</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 45 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao consumo de energia elétrica na secagem térmica das lamas</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 46 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte das lamas para a central de incineração</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 47 - Emissões de CO₂ equivalente evitadas devido à produção de energia elétrica na incineração das lamas</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 48 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte das cinzas para aterro sanitário</i>	<i>68</i>

Lista de abreviaturas

CBO - Carência Bioquímica de Oxigénio

C/N - Razão Carbono Azoto

DL - Decreto-Lei

EDP - Energias de Portugal

ERSAR - Entidade Reguladora dos Serviços de Água e de Resíduos

ETAR - Estação de Tratamento de Águas Residuais

GEE - Gases com Efeito de Estufa

MS - Matéria Seca

MV - Matéria Volátil

PCS - Poder Calorífico Superior

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SST - Sólidos Suspensos Totais

SSV - Sólidos Suspensos Voláteis

UE - União Europeia

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Nos últimos anos, tem-se assistido a um aumento das redes de saneamento e de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETARs), consequência das cada vez mais exigentes metas impostas pela União Europeia (UE). Segundo dados do *Eurostat*, no ano de 1998, apenas 42% da população nacional era servida pela rede de saneamento e tratamento de águas residuais, sendo que em 2008 este valor era já de 70%.

A existência de uma rede cada vez mais completa de sistemas de saneamento e tratamento de águas residuais tem tido um impacto muito positivo na gestão dos recursos hídricos do país, no entanto, este tipo de tratamento produz subprodutos que devem ter um destino final adequado.

As lamas representam o principal subproduto decorrente do funcionamento das ETARs. As características das lamas dependem da composição das águas residuais e dos tratamentos a que estas estão sujeitas, podendo-se dividir em duas tipologias: lamas primárias, resultantes dos processos de tratamento primário, e lamas secundárias, resultantes do processo de tratamento biológico.

Devido à elevada produção de lamas, as ETARs devem estar equipadas com tecnologia eficiente para o tratamento da fase sólida, nomeadamente processos de espessamento, estabilização e desidratação, existindo ainda a possibilidade de se recorrer a tecnologias complementares dependendo do destino final a dar às lamas.

O destino final das lamas é um problema real que não reúne consenso por parte da comunidade científica, uma vez que todas as opções têm vantagens e desvantagens cujo impacto depende de vários fatores. A valorização agrícola, a incineração e a deposição em aterro sanitário representam as principais opções de destino final das lamas produzidas nas ETARs. Todas estas alternativas estão regulamentadas a nível comunitário e nacional, através de Diretivas e Decretos-lei, que condicionam as operações de tratamento e deposição das lamas e dos resíduos (nos quais as lamas se inserem).

Em Portugal, ainda não existem processos de incineração de lamas, sendo que em 2001, 30% das lamas eram utilizadas para valorização agrícola e o restante era maioritariamente enviado para aterro (EEA, 2001). Nos últimos anos, têm sido desenvolvidos esforços para a minimização dos resíduos biodegradáveis que são enviados para aterro, incentivando substancialmente a prática de valorizar as lamas em solos agrícolas. As medidas

implementadas tem tido sucesso, e já em 2006, cerca de 56% das lamas produzidas eram utilizadas na agricultura (*Milieu et al, 2008*).

A valorização agrícola permite aproveitar a matéria orgânica e os nutrientes das lamas, no entanto, a presença de metais pesados e microrganismos patogénicos pode inviabilizar esta opção de destino final. Nestes casos, a compostagem das lamas pode ser uma alternativa, uma vez que este processo permite higienizar as lamas produzidas devido às temperaturas atingidas (50-60°C) (*Costa et al, 2002*).

A incineração apresenta-se como uma alternativa para situações em que as lamas não possam ser encaminhadas para valorização agrícola. Esta opção pode ser vista como uma prática de valorização das lamas nos casos em que o calor produzido nos processos de combustão é recuperado sob forma de energia térmica ou elétrica. Apesar do poder calorífico das lamas ser considerável, o teor de humidade pode representar um problema, impedindo que as lamas sejam incineradas sem a utilização de um combustível auxiliar. Nestes casos, uma alternativa viável passa pela utilização de sistemas de secagem térmica para a redução da humidade presente nas lamas.

A deposição em aterro é uma prática cada vez menos utilizada, esperando-se que esta tendência se mantenha nos próximos anos, devido às metas comunitárias e nacionais estabelecidas para a redução dos resíduos biodegradáveis depositados por esta via.

A energia consumida na fase líquida e na fase sólida das ETARs representa um fator importante a nível económico, ambiental e social. A diminuição da fatura energética possibilita obter economias que mais tarde se fazem sentir numa redução das tarifas impostas aos consumidores. Esta redução permite também reduzir a emissão de gases com efeito de estufa (GEE) para a atmosfera, o que desde logo diminui a contribuição do impacto das ETARs no aquecimento global do planeta.

1.2 Objetivo

O objetivo do estudo proposto passa por elaborar uma análise profunda dos problemas associados ao destino final das lamas produzidas nas ETARs. Esta análise passa pela comparação dos processos de tratamento e valorização existentes, assim como do desenvolvimento de metodologias para a otimização dos diferentes destinos finais em termos económicos, sociais e ambientais. O trabalho centraliza-se na elaboração de modelos de simulação para avaliação e otimização dos vários processos de tratamento e valorização existentes.

1.3 Legislação

As lamas resultantes do tratamento de águas residuais são classificadas como um resíduo não perigoso, devendo por isso respeitar os princípios e normas definidos no DL nº 73/2011. Este Decreto-Lei estabelece o regime geral para a prevenção, produção e gestão de resíduos, transpondo para a ordem jurídica interna a Diretiva nº 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro.

Neste decreto constam alguns princípios para a gestão de resíduos, sendo que para o caso em estudo das lamas geradas no tratamento de águas residuais se destacam o Princípio da Responsabilidade pela Gestão, em que é definido que cabe ao produtor inicial a gestão dos resíduos a que dá origem, e o Princípio da Hierarquia da Gestão dos Resíduos, em que se define a seguinte ordem de prioridades na gestão de resíduos: prevenção e redução, reutilização, reciclagem, valorização e eliminação.

Atualmente, as principais opções de gestão e eliminação das lamas são a valorização agrícola, tecnologias de eliminação e/ou valorização térmica, como sistemas de incineração e co-incineração, e a deposição das lamas em aterro. Cada um destes destinos finais está sujeito a um regime jurídico específico.

O regime jurídico para a utilização de lamas de depuração em solos agrícolas é definido pelo DL nº 276/2009, transpondo para a ordem interna a Diretiva nº 86/278/CEE do Conselho, de 12 de junho. Neste Decreto-lei são reunidos dois aspetos essenciais nas políticas de ambiente, nomeadamente a credibilização da operação de valorização de resíduos e a proteção do ambiente e da saúde humana. Para isso é definido um conjunto de restrições à utilização das lamas nos solos, entre as quais se destaca o estabelecimento de valores limites em alguns parâmetros, definindo assim as características e a quantidade de lamas utilizáveis para valorização agrícola.

Tendo em conta a hierarquia da gestão de resíduos, esta atividade de valorização tem uma grande importância na gestão das lamas geradas no tratamento de águas residuais, no entanto, importa garantir que a aplicação das lamas não prejudica a qualidade do ambiente, em especial das águas e dos solos, e não constitui um risco para a saúde pública.

Relativamente à utilização de tecnologias de incineração e co-incineração para a eliminação de resíduos, é o DL nº 85/2005 que unifica o quadro legal aplicável, transpondo para a ordem interna a diretiva nº 2000/76/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de dezembro. Este processo pode ser visto como uma operação de valorização das lamas nas situações em que é aproveitado o calor gerado na combustão, como é o caso da co-incineração em cimenteiras e incineração com geração de energia elétrica.

Neste Decreto-lei são definidas medidas de controlo e monitorização para exploração de instalações de incineração e co-incineração, ao nível das emissões atmosféricas, descargas de águas residuais, e resíduos gerados no processo.

A deposição de resíduos em aterro é regulamentada através do DL n.º 183/2009, que transpõe para o direito nacional a diretiva n.º 1999/31/CE, do Conselho, de 26 de abril. Este Decreto-lei, para além de definir o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro, é também responsável por estabelecer os requisitos gerais a observar na conceção, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros, incluindo as características técnicas específicas para cada classe de aterros.

A estratégia nacional para a redução de resíduos urbanos biodegradáveis destinados a aterro fixa os objetivos de reduzir esta tipologia de resíduos em 50% e 65%, em peso e face aos valores de 1995, até 2013 e 2020, respetivamente. Com esta estratégia e com a priorização hierárquica da gestão de resíduos, torna-se importante minimizar a quantidade de lamas que são enviadas para aterro, otimizando processos de valorização dessas mesmas lamas em detrimento da sua deposição.

1.4 Pesquisa de Informação

A pesquisa de informação para o desenvolvimento dos resultados relativos a esta dissertação foi efetuada recorrendo a:

- Pesquisa bibliográfica, como documentos legislativos, livros, artigos científicos e material académico;
- Aquisição de dados práticos decorrentes do funcionamento de ETARs;
- Consulta de empresas especializadas no encaminhamento das lamas, entidades gestoras do setor dos resíduos e empresas detentores de tecnologias para o tratamento da fase sólida nas ETARs;
- Preços de mercado para a contratação de serviços e para a aquisição/comercialização de produtos.

1.5 Estrutura da dissertação

No primeiro capítulo é realizado o enquadramento do tema em estudo, apresentando-se também os principais documentos legislativos para o destino final das lamas, os objetivos do trabalho a realizar e as fontes utilizadas para a recolha de informação.

O capítulo 2 é relativo ao estudo da energia nas ETARs. Neste capítulo são desenvolvidas várias considerações ao nível da dependência energética, dos preços praticados nesta indústria e dos impactos associados à produção e consumo de energia. Os dados apresentados permitem justificar algumas das opções propostas ao longo desta dissertação.

A revisão bibliográfica relativa ao tema que se propõe estudar é desenvolvida nos capítulos 3, 4 e 5. Nestes capítulos realiza-se um levantamento das tecnologias existentes para o tratamento da fase sólida nas ETARs e dos destinos finais possíveis para o encaminhamento das lamas produzidas.

O capítulo 6 apresenta a metodologia adotada para a realização desta dissertação, descrevendo-se sucintamente os procedimentos efetuados para a obtenção dos resultados finais.

O capítulo 7 descreve o funcionamento da ETAR em estudo, quantificando-se a produção de lamas nos processos de tratamento escolhidos. Ainda nesta fase, é realizado um balanço energético aos sistemas de tratamento da fase sólida.

No capítulo 8 são simulados 4 cenários distintos para o destino final das lamas produzidas na ETAR em estudo, apresentando-se para cada cenário os custos e as emissões de GEE relativas aos consumos de energia nas diferentes fases do tratamento e encaminhamento das lamas.

No capítulo 9 os resultados obtidos são discutidos através de uma rigorosa análise aos cenários propostos, os comentários efetuados tem em consideração uma vertente económica, social e ambiental.

As conclusões são apresentadas no capítulo 10, proporcionando uma avaliação final do trabalho efetuado e sugerindo sugestões para futuros estudos académicos ou aplicações práticas, considerando os resultados apresentados e o conhecimento adquirido.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas consultadas na elaboração desta dissertação.

2 Energia nas ETARs

A energia é um fator de competitividade decisivo no desenvolvimento das sociedades modernas, podendo-se gerar economias importantes na diminuição do consumo energético das empresas. A produção e utilização de energia estão na origem de problemas ambientais, principalmente resultantes da utilização de combustíveis fósseis (Rego, 2012).

A dependência energética resulta principalmente da necessidade de se importar fontes de recursos energéticos não renováveis, como petróleo, gás natural e carvão. Este é um problema da Europa em geral e de Portugal em particular, representando uma das principais razões de endividamento dos países ocidentais. Dados do *Eurostat* permitem verificar que a dependência energética de Portugal é ainda assim muito superior à média da UE (figura 1).

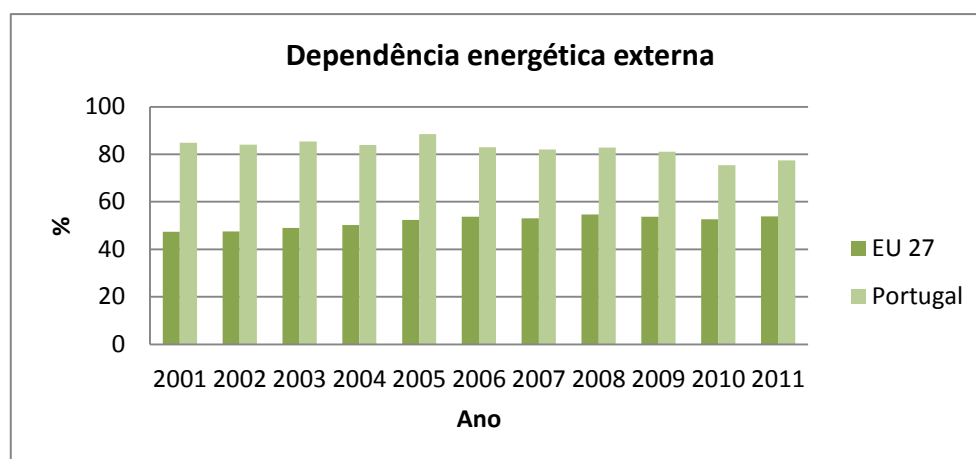


Figura 1 - Evolução da dependência energética externa da UE e de Portugal

As principais estratégias para a diminuição desta dependência externa passam pela produção de energia através de fontes renováveis e pela diminuição do consumo energético, consequente do aumento da eficiência dos processos utilizados. Os serviços de tratamento de águas residuais em Portugal são maioritariamente geridos por entidades públicas, sendo por isso do interesse destas entidades a redução da dependência energética externa.

Em Portugal, o preço da energia elétrica para consumo nas indústrias tem vindo a aumentar, sendo que segundo dados do *Eurostat* este aumento foi na ordem dos 60 % desde o ano de 2001 até 2012 (figura 2).

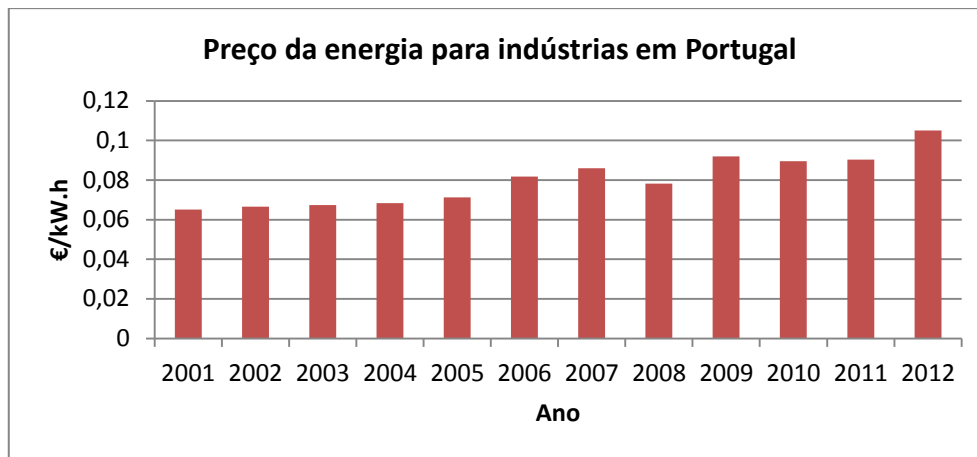


Figura 2 - Evolução do preço da energia para indústrias em Portugal

Tendo em conta a tendência de subida do preço da energia elétrica para consumo industrial, as ETARs devem optar, cada vez mais, pela utilização de sistemas com menores consumos energéticos para o tratamento das águas residuais e das lamas produzidas nos diferentes processos.

Os custos relativos às lamas geradas nas ETARs estão também relacionados com o transporte até ao local de destino final. A taxa a pagar pelo transporte das lamas está dependente dos custos dos combustíveis fósseis derivados do petróleo. O preço destes combustíveis também têm vindo a subir nos últimos anos, sendo que esta tendência se deverá manter devido à contínua necessidade de um recurso que se vem tornado cada vez mais escasso.

Devido aos factos apresentados, ao longo desta dissertação são tomadas opções que têm em conta a diminuição do consumo energético da ETAR a fontes de energia externas. De seguida são apresentadas algumas das alternativas para se atingir esses objetivos:

- Tratamento das lamas por digestão anaeróbia, com aproveitamento do biogás em sistemas eficientes, com produção de energia elétrica e/ou calorífica para venda à rede ou para utilização direta nas instalações da ETAR;
- Selecionar equipamentos com consumos de energia mais reduzidos e com boa eficiência energética;
- Minimizar o volume de lamas produzidas na ETAR, diminuindo os custos de transporte destas até ao destino final;
- Optar por destinos finais cuja distância à ETAR seja mais reduzida;
- Estudar a possibilidade de incinerar as lamas em conjunto com RSU, aproveitando o poder calorífico destas lamas para gerar energia elétrica e/ou calorífica.

De forma a comparar a energia elétrica consumida na ETAR para o tratamento das lamas e os consumos de energia associados ao seu transporte, recorre-se ao estudo das emissões equivalentes de CO₂. Esta análise permite comparar duas formas distintas de energia tendo em conta o seu impacto no ambiente.

Por fim, é de referir que um estudo holandês prevê a autossuficiência energética das ETARs europeias até 2030 (*STOWA, 2010*), devendo por isso começar a ser desenvolvidos esforços para atingir este objetivo, que será muito importante no cumprimento das metas europeias definidas.

3 Sistemas de tratamento de lamas

As lamas geradas no tratamento de águas residuais devem ser tratadas para que possam ser enviadas para destino final adequado. Este tratamento permite a diminuição do volume de lamas e a sua estabilização, minimizando assim os custos de transporte e melhorando as condições de armazenamento nas instalações das ETARs. Para um tratamento eficaz é importante ter um conhecimento prévio das características das lamas, sendo que estas características irão depender do efluente a ser tratado, assim como dos processos utilizados nas estações de tratamento.

As lamas produzidas em ETARs podem ser divididas em dois tipos: lamas primárias, resultantes de processos de decantação primária, e lamas secundárias, que são subprodutos dos sistemas de tratamento biológico.

A concentração de sólidos nas lamas primárias varia entre 2% e 7%, valor muito superior ao verificado no caso das lamas secundárias que varia entre 0,5% e 1,5% (*Metcalf & Eddy, 1991*). Devido ao menor teor de humidade, as lamas primárias são facilmente espessadas graviticamente, ao contrário das lamas secundárias que normalmente necessitam de processos mecânicos ou de flotação por ar dissolvido.

A fração de sólidos voláteis varia entre 60% e 80% nas lamas primárias e entre 59% e 88% nas lamas secundárias (*Metcalf & Eddy, 1991*).

Os principais processos de tratamento utilizados para o tratamento das lamas em ETARs são:

- Tratamento preliminar
- Espessamento
- Estabilização
- Desidratação
- Secagem térmica

3.1 Tratamento preliminar

O tratamento preliminar das lamas tem o objetivo de facilitar os tratamentos a jusante, garantir um caudal constante e homogéneo e diminuir os custos do tratamento da fase sólida nas estações de tratamento (*Sousa, 2005*). As operações preliminares mais comuns no tratamento de lamas de ETAR são a trituração, a gradagem, a desarenação gravítica, a

mistura de lamas primárias e secundárias e o armazenamento prévio das lamas antes do tratamento.

Este tipo de tratamento tem especial interesse nas ETARs mais antigas que não possuem tratamentos preliminares do efluente a tratar, como processos de gradagem, crivagem, e desarenação.

Nas ETARs mais recentes é comum existirem processos de mistura e armazenamento prévio das lamas. A mistura das lamas primárias e secundárias pode ser feita antes de se iniciar o tratamento, no caso de serem submetidas ao mesmo processo, ou quando os processos de tratamento dessas lamas são diferentes, as lamas são misturadas numa fase intermédia ou final do seu tratamento. O armazenamento prévio para além de regular e homogeneizar o caudal de lamas para tratamento, permite também que estas lamas sejam tratadas em horas de menor consumo de energia, o que no caso de existirem equipamentos mecânicos pode ter um impacto muito positivo na fatura energética das ETARs.

3.2 Espessamento

O espessamento visa a redução do volume das lamas por remoção da fração líquida, resultando assim num produto com uma concentração de sólidos mais elevada. Os processos existentes para o espessamento das lamas são o espessamento gravítico, a flotação por ar dissolvido e o espessamento mecânico. A escolha do processo mais indicado para o tratamento das lamas deve ter em conta as características e a quantidade de lamas a tratar.

O espessamento gravítico é normalmente a solução mais adequada para o tratamento de lamas com uma elevada concentração de sólidos, como é o caso das lamas primárias. Neste tipo de tratamento os sólidos são decantados e acumulados no fundo, sendo o sobrenadante gerado no processo reinserido no sistema de tratamento de água (Metcalf & Eddy, 1991).



Figura 3 - Espessador gravítico na ETAR do Febros (adaptado de Águas de Gaia)

Os processos de flotação por ar dissolvido são normalmente utilizados para o tratamento das lamas secundárias, uma vez que são eficazes no espessamento de lamas com uma reduzida taxa de sedimentação e permitem a remoção dos maus cheiros, exigindo no entanto um consumo energético muito elevado (EC, 2001). Devido a este consumo energético e à necessidade de adição de polímero, este tipo de espessamento é mais utilizado em ETARs de grande dimensão.

Os sistemas de espessamento mecânico são realizados mediante mesas de espessamento, tambor rotativo e centrifugadoras.

Nas mesas de espessamento é utilizado um condicionamento químico, através da adição de polímero, para formação de flocos de maiores dimensões aumentando o rendimento do processo. O sistema consiste na separação física dos sólidos e da fração líquida do fluido através de uma tela filtrante. As mesas de espessamento têm um sistema de lavagem automática, permitindo que a tela não fique colmatada com os sólidos filtrados (Metcalf & Eddy, 1991).



Figura 4 - Mesas de espessamento (adaptado de ANDRITZ)

O espessamento por tambor rotativo é também realizado com a adição de polímero. Este sistema é utilizado em ETARs de pequena dimensão por apresentar baixos custos de exploração. Os tambores rotativos têm também as vantagens de ter uma necessidade reduzida de manutenção e de precisarem de pouco espaço para a sua aplicação (Metcalf & Eddy, 1991).

O espessamento por centrifugação promove uma decantação forçada dos sólidos, funcionando continuamente e de forma automática, podendo-se recorrer em alguns casos à adição de condicionante. Este processo de espessamento tem elevados custos de exploração e investimento, sendo assim mais utilizado em ETARs de grandes dimensões.

3.3 Estabilização

A estabilização das lamas geradas no tratamento de águas residuais visa inibir o potencial de putrefação das lamas, eliminar odores ofensivos e reduzir a quantidade de organismos patogénicos presentes (*Simões et al, 2008*). Este processo de estabilização pode ser realizado por via biológica, química e física.

A necessidade de estabilização está relacionada com o destino final a dar às lamas. Se estas forem utilizadas para valorização agrícola, a estabilização é um processo de extrema importância e deve ser efetuada para reduzir a quantidade de organismos patogénicos, por outro lado se o destino final é a incineração ou a deposição em aterro, nem sempre se recorre a processos de estabilização das lamas (*Sousa, 2005*).

A estabilização biológica pode ser realizada em condições anaeróbias ou aeróbias. Estes sistemas são mais à frente desenvolvidos, devido à complexidade processual e à importância no tratamento de lamas de ETARs.

A adição de cal é o processo mais utilizado para a estabilização química das lamas. A alcalinidade que a cal transmite, torna o meio inadequado para o crescimento de microrganismos patogénicos, possibilitando também a eliminação de maus odores e a precipitação de metais tóxicos (*Sousa, 2005*). No caso da aplicação futura em terrenos com elevada acidez, a alcalinidade fornecida pela adição de cal torna as lamas num corretor de pH eficaz, aumentando o seu valor comercial. A adição de cal permite aumentar a quantidade de matéria seca nas lamas, tornando assim mais fácil a operação de armazenamento e encaminhamento das lamas para destino final adequado (*EC, 2001*).

A estabilização física pode ser realizada através de processos de pasteurização, que consiste num tratamento térmico das lamas que visa a eliminação dos organismos patogénicos presentes. Existem sistemas em que se realizam em simultâneo a estabilização química com cal e métodos de pasteurização, estes processos são denominados por calagem avançada, e apresentam um resultado final muito satisfatório (*Florindo, 2009*).

A estabilização química e física podem ter também a função de melhorar as condições de desidratação das lamas, funcionando como um processo de condicionamento. O condicionamento é um processo dispendioso, sendo a adição de materiais inertes desagregados uma alternativa economicamente viável para o aumento da coesão das lamas (*Carvalho, 2010*).

3.4 Desidratação

A desidratação tem o objetivo de diminuir o volume total de lamas, através da redução do teor de humidade presente, diminuindo assim os custos de armazenamento, transporte e destino final das lamas produzidas em ETARs.

Os processos de desidratação de lamas podem ser naturais ou mecânicos. A escolha do método de desidratação mais adequado deve ter em conta o espaço disponível na estação de tratamento, assim como a quantidade, a composição e o destino final das lamas.

Os leitos de secagem e as lagoas de lamas são os métodos de desidratação natural mais utilizados. Estes sistemas necessitam de grandes áreas específicas por tonelada de lama, sendo a sua aplicação adequada para ETARs de pequenas dimensões, onde o espaço disponível não constitui um problema e a produção de lamas é relativamente reduzida. A principal vantagem da aplicação de sistemas deste tipo são os baixos custos de investimento e exploração.



Figura 5 - Leitos de secagem de lamas (adaptado de DMC Contracting)

Nas ETARs de maior dimensão são utilizados sistemas mecânicos para a desidratação das lamas, dos quais se destacam os filtros vácuo, os filtros prensa, os filtros banda e as centrifugadoras.

Os filtros vácuo são um sistema de desidratação de lamas que apesar de muito utilizado no passado, já não representa uma solução viável para as ETARs atuais, devido à complexidade do processo e aos elevados custos de manutenção e operação.

A desidratação das lamas em filtros prensa é um processo eficiente, todavia o facto de não funcionar em contínuo torna esta tecnologia pouco utilizada no tratamento de efluentes domésticos. No entanto, tem sido desenvolvido um sistema de filtro prensa do tipo parafuso sem fim, que permite um funcionamento contínuo e que apresenta valores de eficácia próximos dos filtros de prensa convencionais (Pita, 2002).

Os filtros banda são sistemas de desidratação na qual as lamas são sujeitas a um processo de condicionamento químico (adição de polímero) e são submetidas a uma pressão elevada. Quando a acumulação das lamas atinge um determinado nível é automaticamente acionado o sistema de tração que permite a substituição da tela saturada por uma equivalente limpa. Estes tipos de filtros são resistentes à corrosão, apresentam boa flexibilidade e são de fácil operação e manutenção (Pita, 2002).



Figura 6 - Filtro de banda para desidratação de lamas (adaptado de HUBER)

A desidratação de lamas por centrifugação é um processo totalmente automatizado, estando no entanto limitado apenas à possibilidade de alterar a velocidade de centrifugação, o caudal de lamas e a dosagem de polímero. As centrífugas podem ser utilizadas para desidratar lamas sem utilização de condicionamento químico, mas a captura de sólidos e a qualidade da água clarificada é melhorada consideravelmente quando os sólidos são condicionados com polímeros (Metcalf & Eddy, 1991). Este tipo de equipamento engloba vantagens quando existem grandes quantidades de óleos e gorduras nas lamas, operando com uma maior limpeza de instalação e menor libertação de cheiros (Pita, 2002). No entanto é um sistema que acarreta elevados custos de investimento e de exploração.



Figura 7 - Centrífuga para desidratação de lamas (adaptado de ANDRITZ)

3.5 Secagem térmica

A secagem térmica das lamas de ETARs é um processo utilizado quando se pretende atingir concentração de sólidos superiores aos verificados nos processos de desidratação. Este processo tem especial importância quando o destino final das lamas é a incineração. As temperaturas atingidas permitem apenas remover a humidade presente na lama, mantendo assim grande parte da quantidade inicial de sólidos (*Metcalf & Eddy, 1991*).

Os principais impactos associados à secagem das lamas são a geração de odores e a emissão de partículas para a atmosfera, devendo por isso existir sistemas de tratamento a jusante deste processo (*Metcalf & Eddy, 1991*).

A secagem das lamas pode ser distinguida entre secagem direta e indireta. Nos secadores diretos o fluido térmico está em contacto com as lamas, e nos secadores indiretos estes estão separados por uma superfície intermédia (*Santos, 2012*).

Apesar da elevada redução do volume, a secagem térmica das lamas exige grandes quantidades de energia e mão de obra qualificada, tendo assim custos de exploração muito elevados. Posto isto, e tendo em conta a ausência de sistemas de incineração de lamas em funcionamento, este processo é ainda pouco utilizado em Portugal.



Figura 8 - Sistema de secagem térmica de lamas em Clos de Hilde, França (adaptado de ANDRITZ)

4 Tratamento Biológico de Lamas

Como já foi referido, o tratamento biológico tem um carácter estabilizador nas lamas produzidas, permitindo melhorar as suas características de higienização. Este tratamento pode ser realizado em condições anaeróbias, como a digestão anaeróbia, ou aeróbias, como o arejamento prolongado, a compostagem ou a vermicompostagem das lamas.

A elevada quantidade de matéria orgânica nas lamas de ETARs deve ser valorizada sempre que a escala económica o permita. Essa valorização pode ser realizada de várias formas, desde geração de energia até à aplicação na agricultura.

A valorização agronómica exige que as lamas sejam um produto higienizado e que cumpram a legislação em vigor, onde são estabelecidos valores limite para alguns parâmetros da composição das lamas. Assim, para que se consiga obter as condições ideais para aplicação no solo, as lamas devem ser sujeitas a tratamentos biológicos eficazes e onde alguns parâmetros do processo são criteriosamente controlados.

Em todos os processos biológicos para o tratamento de lamas de ETARs consegue-se diminuir o volume total da fração sólida, obtendo-se assim custos mais reduzidos nos sistemas de tratamento a jusante e no encaminhamento das lamas para destino final adequado.

4.1 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo de degradação da matéria orgânica na ausência de oxigénio, através de microrganismos anaeróbios. Este processo tem como principal produto o metano, gás com elevado potencial energético e pode ser descrito em quatro fases distintas, nomeadamente a hidrólise, a acidogénese, a acetogénese e a metanogénese.

Na hidrólise os polímeros orgânicos (proteínas, hidratos de carbono e lípidos) são convertidos nos seus monómeros (aminoácidos, açúcares e ácidos gordos de cadeia longa, respetivamente), pela ação de enzimas extracelulares. Na acidogénese os monómeros formados são convertidos em compostos intermediários, como o dióxido de carbono, o hidrogénio e ácidos gordos voláteis, através de células bacterianas fermentativas. Na acetogénese há a decomposição dos produtos da acidogénese em acetato, dióxido de carbono e hidrogénio, por ação das bactérias homoacetogénicas e das bactérias sintróficas. Na metanogénese, o metanol, ácido acético, hidrogénio e o dióxido de carbono são convertidos em metano, sendo as bactérias metanogénicas responsáveis por essa conversão. (Carvalho, 2010).

No processo de digestão anaeróbia é importante o controlo de alguns fatores, nomeadamente a temperatura, o pH, a relação carbono/azoto, a alcalinidade, o tempo de retenção, o grau de agitação, a concentração de hidrogénio e a presença de substâncias inibidoras ou tóxicas.

Os processos de digestão anaeróbia há muito que são utilizados para a estabilização de lamas de ETARs. Estudos desenvolvidos têm permitido desenvolver e melhorar os sistemas existentes ao nível da diminuição dos tempos de residência e no aumento da estabilidade do processo (Sousa, 2005).

O biogás produzido nos sistemas de digestão anaeróbia tem um potencial energético muito elevado, sendo a principal vantagem deste processo em relação às restantes alternativas de tratamento biológico das lamas geradas em ETARs. Com a produção de energia a partir do biogás é possível diminuir a fatura energética das estações de tratamento e reduzir a emissão de GEE, com a substituição da energia proveniente de combustíveis fósseis.

Independentemente da estratégia de valorização, o biogás deve sofrer um processo de depuração para que a sua qualidade consiga cumprir as exigências do sistema de valorização. A depuração consiste na remoção das impurezas do biogás, como o vapor de água, o dióxido de carbono e o sulfureto de hidrogénio, de forma a aproximar a sua qualidade com a do gás natural.

Para a análise da viabilidade económica é necessário estimar os custos de investimento dos sistemas de digestão anaeróbia, calcular a quantidade de biogás gerado, determinar a alternativa de exploração da energia elétrica e/ou calor produzidos mais adequada tendo em consideração as necessidades da ETAR e por fim analisar o valor comercial do composto produzido.

O armazenamento do biogás permite que se possa fazer a gestão da energia gerada consoante as necessidades do processo, ou nos casos de venda à rede pública, maximizar a energia produzida nas horas de maior consumo, obtendo assim maiores contrapartidas financeiras.



Figura 9 - Gasómetro e digestores anaeróbios na ETAR Barreiro/Moita (adaptado de SIMARSUL)

Atualmente a melhor estratégia para a gestão do biogás produzido no tratamento de lamas de ETARs consiste normalmente na utilização de sistemas de cogeração de energia, vendendo-se a energia elétrica produzida à rede e aproveitando o calor gerado no processo para o aquecimento de digestores e em infraestruturas que até então utilizavam energia elétrica para o aquecimento.



Figura 10 - Sistema de Cogeração de energia (adaptado de Cheng)

Devido aos elevados custos de investimento e à necessidade de acompanhamento qualificado, a utilização de digestores anaeróbios no tratamento da fase sólida são viáveis apenas em ETARs de grande dimensão, onde a quantidade de biogás produzido pode vir a justificar o investimento.

4.2 Arejamento Prolongado

Nos sistemas de arejamento prolongado as lamas são sujeitas a uma fonte externa de oxigénio, de forma a criar-se as condições necessárias ao desenvolvimento dos microrganismos que decompõem a fração facilmente biodegradável da matéria orgânica. Este processo de digestão demora entre duas e sete semanas, e ocorre dentro de digestores aeróbios ou em câmaras abertas (Florindo, 2009).

As variantes dos processos de arejamento prolongado mais utilizadas são sistemas de digestão aeróbia em contínuo ou em “batch” e arejamento com injeção de oxigénio puro (Sousa, 2005).

Devido a não existir formação de metano, os custos associados a este tipo de processo são superiores em relação aos sistemas de digestão anaeróbia, no entanto, devido à complexidade dos processos relativos à captação, tratamento, armazenamento e queima do biogás, os sistemas de arejamento prolongado podem representar uma solução eficaz para ETARs de pequena dimensão.

Apesar dos custos de investimento serem relativamente reduzidos, os sistemas de arejamento prolongado exigem consumos energéticos consideráveis, tendo assim custos de exploração elevados. O produto resultante deste processo pode ter um interessante poder fertilizante, podendo assim ser utilizado para valorização agrícola.

4.3 Compostagem

A compostagem é um processo de transformação biológica da fração orgânica, que resulta na formação de um composto estabilizado e livre de agentes patogénicos. Devido às suas características o composto pode ser utilizado como fertilizante ou estruturante do solo, reduzindo a contaminação consequente da utilização de fertilizantes químicos e promovendo a retenção de água no solo. A qualidade do produto final na compostagem de lamas de ETAR não é sempre a mesma, pois depende das características das lamas e dos sistemas de compostagem utilizados.

O processo de compostagem ocorre em duas fases distintas, nomeadamente a degradação ativa e a maturação. A degradação ativa é caracterizada por uma intensa atividade microbiana onde é degradada grande parte da matéria orgânica presente nas lamas. Na maturação os compostos mais complexos são degradados, ocorrendo assim a estabilização do composto. A ausência de amónia e de odores ofensivos, o decréscimo da temperatura e do conteúdo orgânico do composto e a presença de constituintes químicos como os nitratos são indicadores que permitem aferir a estabilidade do composto e considerar terminado o período de maturação (*Mendes, 2009*).

A qualidade do composto depende em grande escala do controlo de fatores de compostagem, nomeadamente, temperatura, pH, arejamento, teor de humidade, relação carbono/azoto e tamanho das partículas. Assim a compostagem é uma técnica de valorização das lamas em que o controlo e aplicação prática dos conceitos teóricos têm de ser eficaz, principalmente quando se tem em vista a comercialização do composto para fins agronómicos.

A compostagem pode ser classificada de diferentes formas consoante o tempo e as condições de realização do processo de estabilização. Os sistemas de compostagem mais utilizados são pilhas estáticas, pilhas revolvidas e sistemas em reator. A tipologia de compostagem utilizada no tratamento de lamas de ETAR depende dos seguintes parâmetros: quantidade de lamas a estabilizar, custos, área disponível e complexidade operacional.



Figura 11 - Central de compostagem de lamas na ETAR de Parada (adaptado de SMEAS Maia)

Para além da produção de um composto que pode ser comercializado como fertilizante do solo, a compostagem tem também a vantagem de ser um processo flexível ao nível dos produtos a tratar e da escala a que é realizada. Por outro lado os processos de compostagem necessitam de mão de obra e de grandes áreas para a sua aplicação, assim como podem apresentar custos de exploração relativamente elevados.

As lamas de ETAR são caracterizadas por ter elevados índices de humidade e uma razão C/N reduzida, tendo em conta os valores ótimos definidos para um processo de compostagem eficiente. Para combater esta contrariedade normalmente promove-se a adição de material estruturante com uma elevada concentração de carbono e reduzidos teores de humidade, como é o caso da casca de pinheiro e do serrim, que podem ser adquiridos a custos mais reduzidos nos casos de serem refugos resultantes dos processos industriais. Outra forma de contornar este problema é realizar a compostagem conjunta das lamas com a fração orgânica dos RSU, uma vez que esta tipologia de resíduos já se encontra mais próxima dos valores pretendidos de humidade e razão C/N.



Figura 12 - Central de compostagem de lamas e resíduos no Canadá (adaptado de City of Edmonton)

4.4 Vermicompostagem

A vermicompostagem é uma tecnologia de tratamento e valorização controlada da fração orgânica dos resíduos, em que se utiliza espécies de minhocas Epígeas como agente biológico em simbiose com a fauna microbiana. A engenharia na vermicompostagem tem vindo a desenvolver-se e a posicionar-se como um método de baixo custo e gerador de economias de escala (Lourenço, 2010).

A vermicompostagem apresenta vantagens comparativamente a outros processos como a compostagem ou a digestão anaeróbia, essencialmente ao nível da qualidade do produto final, nos custos de investimento e operação, bem como na redução de microrganismos patogénicos e metais pesados (Lourenço, 2010).

A aplicação desta tecnologia no tratamento de lamas de ETAR está limitada a instalações de pequena dimensão, devido à necessidade de grandes áreas para a sua aplicação. No entanto, têm vindo a ser elaborados estudos para aplicação a grande escala de instalações de vermicompostagem para o tratamento das lamas produzidas em ETARs.

5 Opções de destino final de lamas

5.1 Valorização agrícola

A valorização agrícola das lamas, quando bem aplicada, é a opção de destino final mais vantajosa em termos técnicos, económicos e ambientais. Esta é a única possibilidade de destino final que permite valorizar aquilo que as lamas têm de mais importante na sua composição, nomeadamente os nutrientes e a matéria orgânica (Sousa, 2005).

A utilização das lamas na agricultura permite aumentar o teor de matéria orgânica nos solos, assegurando assim a manutenção da fertilidade e a conservação do solo. A presença de nutrientes nas lamas pode suprir algumas das necessidades dos solos, diminuindo assim a necessidade de utilização de fertilizantes químicos. No quadro seguinte apresenta-se a comparação entre os fertilizantes comerciais e as lamas de ETAR estabilizadas ao nível da presença de azoto, fósforo e potássio.

Tabela 1 - Comparação entre o teor de nutrientes nos fertilizantes comerciais e nas lamas (adaptado de Metcalf&Eddy , 1991)

	Nutrientes (% de matéria seca))		
	Azoto	Fósforo	Potássio
Valores relativos aos fertilizantes utilizados na agricultura	5	10	10
Valores relativos às lamas estabilizadas	3,3	2,3	0,3

A aplicação de lamas de ETAR em solos agrícolas, para além do poder fertilizante, pode representar também um eficiente corretor alcalino. As lamas, quando tratadas através de processos de estabilização química com cal, apresentam valores de pH elevados, podendo com isso melhorar as características de solos com elevados índices de acidez.

Apesar das vantagens inerentes a esta valorização, os benefícios da utilização de lamas nos solos agrícolas, só se fazem sentir quando esta aplicação é efetuada corretamente, respeitando as épocas e as técnicas de aplicação, as quantidades a depositar e as condicionantes do solo, do clima e das culturas agrícolas (EEA, 1997).

A produção de lamas é relativamente constante ao longo do ano, no entanto, a aplicação destas na agricultura é sazonal, devendo assim existir locais de armazenamento temporário das lamas até que estejam reunidas as condições pretendidas para a sua valorização. Este armazenamento temporário das lamas e a necessidade de encontrar terrenos agrícolas que

cumpram os requisitos legais, representam alguns dos obstáculos da opção de utilizar as lamas para a valorização agrícola (EEA, 1997).

As lamas podem também conter substâncias prejudiciais aos solos onde são aplicadas, como metais pesados, contaminantes químicos orgânicos e microrganismos patogênicos. A presença destas substâncias pode desvalorizar ou mesmo inutilizar as lamas, impedindo assim que estas sejam utilizadas como corretor do solo e fertilizante agrícola (Sousa, 2005).

Os problemas ambientais causados pela valorização agrícola de lamas são a volatilização de poluentes para o ar, as emissões de poluentes para as águas superficiais e para o solo, a produção de odores e as emissões de escape devido ao transporte das lamas. Estes problemas incorrem em custos indiretos, que devem ser minimizados.

Independentemente da origem das lamas e do tipo do solo onde são depositadas, esta opção de valorização está sujeita ao regime jurídico definido pelo DL n° 276/2009, que transpõe para a ordem interna a Diretiva n° 86/278/CEE, do Conselho, de 12 de junho. Segundo este Decreto-lei as ETARs são responsáveis por fazer análises periódicas às lamas, de forma a controlar a presença de metais pesados, contaminantes químicos orgânicos e microrganismos patogênicos, garantindo que os valores limite na lei sejam respeitados em todos os parâmetros. As ETARs devem também desenvolver processos de tratamento da fase sólida que tenham em vista a higienização das lamas produzidas, adaptando assim as suas características físicas e composição química aos solos onde irão ser aplicadas. Para isso deve-se ter um profundo conhecimento dos sistemas de estabilização utilizados, sejam eles físicos, químicos ou biológicos, e adequar o tratamento às necessidades dos consumidores.



Figura 13 - Valorização agrícola de lamas (adaptado de Bioblog)

Os custos diretos relativos à utilização de lamas na agricultura são: custos de transporte da estação de tratamento até ao armazenamento e deste até à exploração agrícola, custos das análises feitas para determinar a qualidade das lamas e do solo, investimentos feitos em armazenamento e equipamento de dispersão das lamas, custos operacionais, custos com as

operações agrícolas no terreno depois de adicionadas as lamas e custos de carácter administrativo (EEA, 1997).

Esta opção de destino final tem elevados consumos de energia associados ao transporte das lamas até aos locais de armazenamento e destino final, existindo também a possibilidade de se necessitar de quantidades significativas de energia elétrica no caso de se optar por realizar também a compostagem das lamas. Por outro lado, a valorização agrícola das lamas é vista como uma reciclagem de um resíduo que de outra forma teria de ser incinerado ou depositado em aterro, sendo que a sua aplicação tem o importante benefício de diminuir as necessidades de fertilizantes químicos na agricultura.

Para garantir uma perfeita higienização e para evitar a eventual poluição do solo e dos cursos de águas, é aconselhável fazer a compostagem das lamas. Este processo de degradação aeróbia permite higienizar as lamas geradas em estações de tratamento devido às temperaturas atingidas (50-60°C) (Costa *et al*, 2002). A existência de uma central intermédia de compostagem permite não só melhorar a qualidade das lamas, como também funcionar como um local de armazenamento temporário até que as condições para a aplicação nos solos agrícolas cumpram os requisitos legais. A compostagem pode também constituir uma forma de contornar a legislação existente, uma vez que as lamas depois de submetidas a processos de compostagem caem num vazio legislativo, devido à inexistência de legislação em vigor, em Portugal, quanto à qualidade do composto (Candeias, 2008).

As ETARs optam normalmente por contratar serviços externos no caso de optarem pela valorização agrícola das lamas. Estas empresas têm já uma vasta experiência neste tipo de operações de valorização, possuindo desde logo infraestruturas para o armazenamento e/ou compostagem das lamas.

Apesar da existência de legislação abrangente nesta área, existem ainda algumas dúvidas quanto à segurança de aplicar diretamente as lamas em solos agrícolas, ou nas proximidades de zonas sensíveis, como a existência de águas superficiais ou subterrâneas. Estas preocupações estão na origem de estudos para a revisão da legislação nacional e comunitária, existindo assim a necessidade de ter um conhecimento profundo das alternativas de destino final das lamas de ETAR, como a incineração e a deposição em aterro.

5.2 Incineração

A incineração das lamas consiste numa combustão completa, em que se consegue uma redução de volume significativa das lamas desidratadas, podendo representar uma forma de valorização nos casos em que a energia produzida no processo é aproveitada.

Em Portugal não existem processos de incineração de lamas de ETARs, no entanto esta é uma prática muito comum em países desenvolvidos, devido à inexistência nas proximidades de locais para a valorização agrícola e para a deposição em aterro, e devido também às políticas de sustentabilidade energética de alguns países.

Para além da redução de volume e da possível recuperação do calor gerado no processo de combustão, a incineração tem a vantagem de destruir microrganismos patogénicos e compostos tóxicos presentes nas lamas (*Metcalf & Eddy, 1991*).

As principais desvantagens associadas aos sistemas de incineração são os elevados custos de investimento e exploração, a necessidade de mão de obra qualificada, a emissão de poluentes para o ar resultantes do processo de combustão, a produção de cinzas que devem ter um destino adequado e a produção de alguns resíduos que devido às características apresentadas devem ser classificados como perigosos. (*Metcalf & Eddy, 1991*).

As cinzas resultantes do processo de combustão podem conter uma concentração elevada em metais pesados, representando a deposição em aterro o destino final mais utilizado. Existe também a possibilidade de se utilizar as cinzas na indústria cerâmica, conferindo ao material uma melhor estrutura. No entanto a composição variável das cinzas tornam este tipo de valorização material pouco utilizada.

A incineração das lamas é uma alternativa à valorização agrícola, sendo que a este nível os processos de estabilização e higienização das lamas não tem uma importância tão vital como nos casos de deposição nos terrenos agrícolas. Os processos biológicos de estabilização das lamas são ainda responsáveis pela redução do material volátil presente nas lamas, reduzindo assim o seu poder calorífico (*Metcalf & Eddy, 1991*). As lamas desidratadas apresentam teores elevados de humidade para serem incineradas. Para contornar este problema as lamas devem ser submetidas a processos de secagem térmica, ou em alternativa, incineradas com auxílio de um combustível auxiliar.

Os processos de incineração de lamas podem ser divididos em duas categorias: mono-combustão em incineradores dedicados, ou co-combustão em conjunto com RSU, em cimenteiras ou em centrais termoelétricas a carvão.

A tecnologia mais adequada para a mono-incineração das lamas é a combustão em leitos fluidizados, uma vez que este sistema tolera índices mais elevados de humidade que as restantes alternativas (*Simão, 2011*). A produção de lamas numa única ETAR normalmente não justifica o investimento associado a uma central de incineração, sendo que nos casos em que se optar por esta opção de destino final, devem ser desenvolvidos esforços de centralização de um sistema de incineração com a capacidade de tratar lamas provenientes de várias ETARs.



Figura 14 - Sistema de incineração de lamas (adaptado de Degrémont)

A combustão das lamas em sistemas de incineração já existentes permite contornar os elevados custos de investimento associados aos sistemas de incineração. Este tipo de opção depende, no entanto, da existência de infraestruturas que estejam legalmente possibilitadas a utilizar as lamas como combustível.

A incineração das lamas de ETARs em sistemas de tratamento de RSU possibilita a centralização do tratamento de duas tipologias diferentes de resíduos, permitindo assim obter-se economias de escala a vários níveis. Em Portugal, ao contrário do caso das lamas, existem já sistemas de incineração de RSU em funcionamento, podendo representar uma alternativa viável de destino final das lamas geradas nas proximidades destas instalações, onde a valorização agrícola não é possível. Em termos legais não devem existir condicionantes à prática de incinerar as lamas em conjunto com os RSU, uma vez que as lamas são classificadas por lei como um resíduo não perigoso.

A coincineração das lamas em cimenteiras tem vindo a ser uma prática cada vez mais comum. Esta alternativa permite incorporar as lamas no produto final da incineração, o clínquer, funcionando também como combustível alternativo. As cimenteiras têm vindo a promover a utilização de combustíveis auxiliares nos processos de produção de cimento, como é o caso das lamas produzidas em ETARs. A empresa Secil tem desenvolvido estudos para a secagem das lamas utilizando fontes de energia renováveis, ou através do calor residual do processo de combustão (Secil, 2010).

A existência de centrais termelétricas nas proximidades das ETARs pode também representar uma solução de destino final das lamas. Nestes casos, o calor gerado no processo pode também ser utilizado para se realizar uma secagem prévia das lamas antes de serem adicionadas aos fornos de combustão (Rulkens, 2008).

5.3 Deposição em aterro

A deposição em aterro é uma alternativa viável quando as lamas não apresentam condições para serem utilizadas como fertilizantes na agricultura, no entanto, esta solução não aproveita o conteúdo material e energético das lamas. Esta deposição pode ser realizada em aterros de RSU ou em aterros dedicados para a deposição de lamas. Em Portugal, a opção restringe-se apenas à primeira alternativa, uma vez que, atualmente não existem aterros dedicados em funcionamento.

A opção de deposição das lamas em aterro representava até à poucos anos o principal destino final das lamas produzidas em ETARs. No entanto, devido aos incentivos associados à diminuição dos resíduos biodegradáveis a ser enviados para aterro, esta opção tem-se tornado sucessivamente mais cara, diminuindo assim a quantidade de lamas enviadas para aterro.

Para que sejam admitidas em aterro, o Decreto-Lei nº 183/2009 define que as lamas devem ter teores de humidade inferiores a 65%. Na prática este é um problema para as ETARs, uma vez que os sistemas de desidratação utilizados normalmente não chegam a estes valores, sendo assim necessário adicionar-se um material estruturante às lamas, ou recorrer a sistemas de secagem térmica.



Figura 15 - Deposição de lamas em aterro sanitário (adaptado de VCSTAR)

Os aterros têm impactes ambientais decorrentes da sua atividade, nomeadamente a emissão de substâncias com efeito de estufa para a atmosfera (que pode ser minimizado no caso de existir a recolha do biogás produzido) e a poluição das águas e dos solos nas proximidades do aterro.

Em suma, e tendo em conta o Princípio da Hierarquia da Gestão dos Resíduos, a deposição das lamas em aterro é a opção de destino final menos adequada para as lamas produzidas em ETARs, devendo representar apenas uma solução temporária nos casos em que existem problemas associados à deposição agrícola ou incineração, ou uma alternativa quando estas opções são de todo impraticáveis.

6 Metodologia

Nesta dissertação são estudados diferentes cenários para o destino final das lamas de uma ETAR, dimensionada para servir uma população equivalente de 200 000 habitantes, equipada com tratamento preliminar (gradagem, desengorduramento e desarenação), primário (decantação gravítica) e secundário (tratamento biológico por lamas ativadas) do efluente. As simulações apresentadas baseiam-se em valores de projeto, considerando-se que as características do efluente a tratar não variam consideravelmente ao longo do tempo.

Numa primeira fase, descreve-se o processo utilizado no tratamento da fase líquida e da fase sólida na ETAR, realizando-se também a simulação da quantidade de lamas produzidas nos diferentes processos utilizados. Ainda nesta fase, faz-se um balanço energético relativo aos sistemas escolhidos para o tratamento das lamas produzidas na ETAR.

Posteriormente propõem-se quatro cenários distintos para o destino final das lamas produzidas. Para além da quantificação das lamas a enviar para destino final, realizam-se, sempre que necessário, dimensionamentos dos equipamentos e instalações para a implementação das tecnologias escolhidas.

Para cada cenário efetua-se uma comparação dos custos associados nas diferentes opções de destino final. No cálculo destes custos tem-se em consideração não só dados obtidos na bibliografia, mas também alguns exemplos práticos dos quais se obtiveram valores credíveis, como estudos dos preços de mercado e dados relativos a instalações já em funcionamento.

Nas situações em que as tecnologias de tratamento das lamas são da competência da ETAR, os custos de investimento e de exploração devem ser estimados. Na elaboração de projetos, os custos de exploração são normalmente divididos em custos fixos e variáveis. Os custos fixos são constantes, independentemente do funcionamento da instalação, por outro lado, os custos variáveis dependem da quantidade de lamas a tratar. Na estimativa orçamental relativa aos diferentes cenários, não é realizada a distinção entre os custos fixos e variáveis, apresentando-se o valor de exploração contemplando desde logo estes dois parâmetros em conjunto.

Cada opção de destino final está associada ao consumo e/ou produção de energia. A energia utilizada pode ser elétrica, térmica ou relativa ao transporte das lamas para os locais de tratamento, armazenamento ou destino final. Para a comparação do impacto ambiental ao nível destas diferentes formas de energia consumidas ao longo dos diversos cenários, utilizam-se fatores de emissão de CO₂ equivalente.

O fator de emissão utilizado para a energia elétrica é relativo aos resultados do grupo EDP no ano de 2012 (*EDP, 2013*). De referir que este fator de emissão também é utilizado quando se recorre à energia térmica proveniente da combustão do biogás numa caldeira, uma vez que essa opção de valorização inviabiliza a produção de energia elétrica, que seria vendida à rede.

Em todos os cenários abordados, é necessário se recorrer a veículos especializados para se fazer o encaminhamento das lamas e outros subprodutos, como o composto produzido nas centrais de compostagem e as cinzas resultantes do processo de incineração. Os fatores de emissão relativos a este transporte foram disponibilizados pela empresa *Degrémont através da ferramenta Lifecarbontool*, obtidos recorrendo à metodologia referente ao GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard (*ASTEE, 2009*), variando consoante o tipo de veículo utilizado.

De salientar que neste estudo se consideram apenas as emissões GEE referentes aos consumos de energia nos diferentes cenários, não se contabilizando as emissões relativas aos processos de degradação de matéria orgânica ou ciclo de vida dos materiais utilizados no tratamento das lamas.

Por fim, realiza-se uma comparação final dos diferentes cenários ao nível da sua aplicabilidade, contabilizando os fatores económicos e ambientais já referidos e também condicionantes relativas à aceitação social dos destinos finais sugeridos nesta dissertação.

7 Caracterização da ETAR em estudo

7.1 Descrição

A ETAR em estudo está dimensionada para servir uma população equivalente de 200 000 habitantes, esperando-se assim uma elevada produção de lamas. As tecnologias de tratamento escolhidas dirigem-se para a minimização da quantidade de lamas, de forma a diminuir os custos associados ao transporte e encaminhamento para destino final. Nessa escolha, contabilizam-se também aspetos relacionados com o consumo e a produção de energia elétrica nas instalações da ETAR.

A ETAR está equipada com sistemas de tratamento preliminar, primário e secundário do efluente. Os subprodutos gerados no tratamento preliminar não são valorizáveis em conjunto com as lamas produzidas no tratamento primário e secundário, não sendo portanto alvo de estudo nesta dissertação.

O tratamento base das lamas produzidas na ETAR em estudo inclui espessamento, digestão anaeróbia e desidratação mecânica das lamas primárias e secundárias, complementando-se o processo com outras tecnologias de tratamento, dependendo das diferentes opções de destino final. O esquema de funcionamento da ETAR é apresentado na figura16, sendo que de seguida se justificam as opções tomadas para o tratamento das lamas.

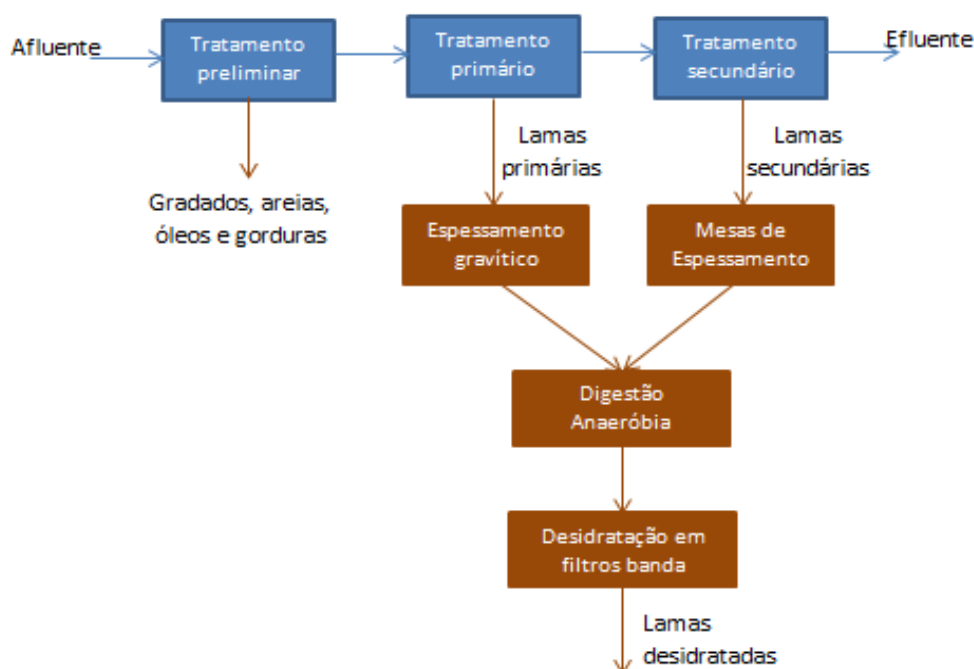


Figura 16 - Esquema de tratamento da fase líquida e da fase sólida na ETAR em estudo

As lamas resultantes da decantação primária do efluente têm um teor de sólidos superior em relação às lamas produzidas no tratamento biológico, que no caso em estudo se optou pela tecnologia de lamas ativadas convencional. Devido às diferenças apresentadas, as lamas primárias e secundárias são espessadas separadamente, utilizando processos de espessamento gravítico e mesas de espessamento, respetivamente. O espessamento gravítico possibilita, a um baixo custo, reduzir o volume total das lamas primárias, enquanto que a utilização de mesas de espessamento permite preparar as lamas secundárias para os processos a jusante, com um consumo de energia elétrica mais reduzido do que os sistemas de espessamento por centrifugação e de flotação por ar dissolvido.

Para a diminuição da fração sólida recorre-se à digestão anaeróbia das lamas espessadas, que devido à elevada taxa de produção de biogás numa ETAR com estas dimensões é um sistema economicamente viável. Para o aproveitamento energético do biogás utiliza-se um sistema de cogeração de energia (energia elétrica e térmica), ou em alternativa uma caldeira para se produzir o calor necessário para os processos de tratamento de lamas da ETAR.

A desidratação das lamas realiza-se em filtros banda, em detrimento da utilização de sistemas de desidratação por centrifugação. Esta opção tem o objetivo de diminuir o consumo energético dos processos de tratamento da fase sólida. Com isto permite-se obter poupanças, que com o aumento do preço da energia ao longo dos anos se poderão vir a tornar ainda mais significativas.

7.2 Produção de lamas

Ao longo desta simulação de previsão da quantidade de lamas utilizam-se dados bibliográficos, dando especial relevância a *Metcalf&Eddy de 1991*.

As lamas são constituídas por duas fases distintas, nomeadamente a humidade e a matéria seca, sendo esta última formada pelos sólidos voláteis (orgânicos) e pelos sólidos fixos (inorgânicos). Para se estimar a produção de lamas na ETAR em estudo começa-se por definir os dados base de projeto, característicos do efluente e da eficiência dos processos de tratamento deste (tabela 2).

Tabela 2 - Dados base da ETAR em estudo e do efluente a tratar

Capacidade de tratamento da ETAR	200.000	hab. eq.
Carga de SST - ¹⁾	18.000	kg SST /d
Carga de CBO - ²⁾	12.000	kg CBO /d
Eficácia de remoção de SST no tratamento primário	65	%
Eficácia de remoção de CBO no tratamento primário	30	%
Eficácia de remoção de CBO no tratamento secundário	90	%

- 1) Considerando uma captação de 90 g SST/hab/d
 2) Considerando uma captação de 60 g CBO/hab/d

As lamas produzidas no tratamento de efluentes domésticos têm elevados teores de material volátil na sua constituição, assim sendo para esta simulação define-se uma percentagem de sólidos voláteis nas lamas primárias e secundárias de 70% e 80%, respetivamente.

Na tabela seguinte apresenta-se os cálculos referentes à produção de lamas resultantes do processo de decantação primária.

Tabela 3 - Produção de lamas primárias na ETAR

Produção de lamas primárias - ¹⁾	11.700	kg MS /d
Concentração de sólidos	5,0	%
Caudal de lamas - ²⁾	234	m ³ /d

- 1) Carga de SST inicial × % remoção de SST no tratamento primário
 2) Considerando uma densidade total das lamas produzidas de 1000 kg/m³

No cálculo das lamas produzidas no tratamento secundário do efluente (tanque de lamas ativadas convencional), utiliza-se um valor de produção específica de lamas biológicas de 0,7 miligramas de SSV por cada miligrama de CBO removida. De seguida são apresentados os valores relativos ao cálculo da produção de lamas secundárias.

Tabela 4 - Produção de lamas secundárias na ETAR

CBO à entrada do tratamento secundário ^{- 1)}	8.400	kg CBO / d
Produção de lamas voláteis ^{- 2)}	5.292	kg SSV / d
Produção de lamas secundárias ^{- 3)}	6.615	kg MS / d
Concentração de sólidos	1,0	%
Caudal de lamas ^{- 4)}	662	m ³ /d

- 1) CBO inicial - CBO removida no tratamento primário
- 2) CBO removida no tratamento secundário × produção específica de lamas biológicas
- 3) Produção de lamas voláteis ÷ % de sólidos voláteis nas lamas secundárias
- 4) Considerando uma densidade total das lamas produzidas de 1000 kg/m³

A produção de matéria seca nas lamas primárias é superior em relação ao verificado nas lamas produzidas no processo biológico de tratamento do efluente. No entanto, o caudal de lamas secundárias é superior, consequência da maior concentração de humidade em relação às lamas primárias.

Devido às diferentes características das lamas primárias e secundárias, estas são espessadas em separado. As lamas primárias são espessadas graviticamente, enquanto que para as lamas secundárias se utilizam mesas de espessamento. Nas tabelas 5 e 6 são expostos os valores relativos ao aumento da concentração de sólidos das lamas nos processos de espessamento.

Tabela 5 - Espessamento gravítico das lamas primárias

Eficácia de captação de sólidos	90	%
Fluxo mássico de lamas espessadas ^{- 1)}	10.530	kg MS / d
Concentração de sólidos nas lamas espessadas	6,5	%
Caudal de lamas espessadas ^{- 2)}	162	m ³ /d

- 1) Lamas primárias (MS) × eficácia de captação de sólidos
- 2) Considerando uma densidade total das lamas produzidas de 1000 kg/m³

Tabela 6 - Mesas de espessamento para o tratamento das lamas secundárias

Eficácia de captação de sólidos	90	%
Fluxo mássico de lamas espessadas ^{- 1)}	5.954	kg MS / d
Concentração de sólidos nas lamas espessadas	5	%
Caudal de lamas espessadas ^{- 2)}	119	m ³ /d

- 1) Lamas secundárias (MS) × eficácia de captação de sólidos
- 2) Considerando uma densidade total das lamas produzidas de 1000 kg/m³

Após as etapas de espessamento, as características das lamas primárias e secundárias já são mais semelhantes em termos de concentração de sólidos, sendo posteriormente misturadas e digeridas anaerobiamente. A digestão anaeróbia das lamas permite a redução dos sólidos voláteis, o que devido à elevada carga orgânica das lamas produzidas possibilita uma considerável redução da matéria seca presente.

Este processo, para além da estabilização e da redução do volume das lamas, tem também a vantagem de produzir biogás, que devido ao seu elevado conteúdo energético é normalmente aproveitado para a produção de energia elétrica e/ou energia térmica que pode ser vendida ou utilizada nos processos existentes na ETAR.

Na tabela seguinte apresentam-se os valores relativos a esta fase do tratamento das lamas, no que diz respeito à destruição da matéria volátil e diminuição da quantidade de lamas para os processos a jusante.

Tabela 7 - Digestão anaeróbia das lamas mistas

Fluxo mássico de lamas a digerir ⁻¹⁾	16.484	kg MS / d
Caudal de lamas a digerir ⁻²⁾	281	m ³ /d
Percentagem de sólidos voláteis nas lamas a digerir ⁻³⁾	73,6	%
Percentagem sólidos voláteis destruídos durante a digestão	55	%
Fluxo mássico de lamas digeridas ⁻⁴⁾	9.810	kg MS / d
Concentração de sólidos nas lamas digeridas	5,0	%
Caudal de lamas digeridas ⁻⁵⁾	196	m ³ /d

- 1) Massa de lamas primárias espessadas (MS) + massa de lamas secundárias espessadas (MS)
- 2) Caudal de lamas primárias espessadas + caudal de lamas secundárias espessadas
- 3) Quantidade de sólidos voláteis ÷ quantidade total de lamas
- 4) Quantidade de lamas a digerir × (% sólidos fixos + % sólidos voláteis não destruídos)
- 5) Considerando uma densidade total das lamas produzidas de 1000 kg/m³

Mais à frente, no cálculo do balanço energético (subcapítulo 7.3), são dimensionados os digestores anaeróbios assim como a energia necessária para os manter em funcionamento. A quantidade de biogás produzida é também estimada, estudando-se a possibilidade de se produzir energia elétrica e térmica num sistema de cogeração, ou em alternativa a produção

de calor para os processos de tratamento na ETAR através da combustão do biogás numa caldeira de água quente.

Por fim, as lamas são desidratadas num sistema de filtros banda. De referir que, devido ao maior teor de sólidos nas lamas, torna-se importante fazer o estudo da densidade associada à matéria seca presente. Para isso, e tendo em conta uma percentagem de voláteis na matéria seca 55,7% após a digestão anaeróbia, define-se um valor de 1000 kg/m^3 para os sólidos voláteis e 2500 kg/m^3 para os sólidos fixos, resultando assim numa densidade da matéria seca presente nas lamas de 1362 kg/m^3 .

Na tabela seguinte expõem-se então os resultados referentes à etapa de desidratação das lamas através de filtros banda.

Tabela 8 - Desidratação das lamas digeridas em filtros banda

Eficácia de captação de sólidos	93	%
Fluxo mássico de lamas desidratadas ⁻¹⁾	9.123	kg MS /d
Concentração de sólidos nas lamas desidratadas	22	%
Caudal de lamas desidratadas ⁻²⁾	39,0	m ³ /d

1) **Massa de lamas digeridas × eficácia de captação de sólidos**

2) **Massa de lamas desidratadas (MS) ÷ densidade da matéria sólida + massa de água nas lamas ÷ densidade da água**

A produção total estimada de lamas na ETAR em estudo, após as etapas de espessamento, digestão anaeróbia e desidratação, é de aproximadamente 41,5 toneladas por dia. Devido ao elevado valor apresentado, é do interesse da ETAR o estabelecimento de alternativas viáveis, em termos económicos, sociais e ambientais, para dar um destino final adequado às lamas produzidas.

7.3 Balanço Energético

No balanço energético relativo ao tratamento das lamas na ETAR em estudo considera-se o consumo de energia nos tratamentos de espessamento e desidratação, assim como a energia produzida recorrente do aproveitamento do biogás gerado no processo de digestão anaeróbia.

Para se calcular a energia elétrica consumida nos processos de tratamento das lamas recorre-se a dados relativos à publicação *Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge*, de 2001 da UE. Este artigo prevê um consumo energético específico nos diferentes processos de

espessamento e desidratação de lamas utilizados em estações de tratamento. Na tabela seguinte podem-se observar estes dados assim como os valores relativos ao consumo energético real, tendo em conta a quantidade de lamas tratadas.

Tabela 9 - Consumos de energia nos sistemas de espessamento e desidratação de lamas

Consumo de energia elétrica específico		
Espessamento gravítico de lamas primárias	5	kW.h/t MS
Mesas de espessamento para as lamas secundárias	50	kW.h/t MS
Desidratação das lamas por filtros banda	35	kW.h/t MS
Consumo de energia elétrica real		
Espessamento gravítico de lamas primárias	58,5	kW.h/d
Mesas de espessamento para as lamas secundárias	297,7	kW.h/d
Desidratação das lamas por filtros banda	343,3	kW.h/d

Na tabela seguinte apresentam-se os dados referentes ao processo de digestão anaeróbia das lamas mistas, assim como os cálculos associados ao dimensionamento dos digestores.

Tabela 10 - Dados do processo de digestão anaeróbia e dimensionamento dos digestores

Quantidade de lamas a digerir (matéria seca) ⁻¹	16.484	kg MS / d
Caudal de lamas a digerir ⁻²	281	m ³ /d
Temperatura de funcionamento do digestor anaeróbio	35	°C
Tempo de retenção das lamas no digestor	14	d
Volume total dos digestores ⁻³	3.935	m ³
Volume unitário dos digestores ⁻⁴	1.967	m ³
Altura dos digestores	10	m
Área superficial unitária ⁻⁵	197	m ²
Diâmetro adotado para os digestores ⁻⁶	16	m
Volume total dos digestores utilizando o diâmetro adotado	2.011	m ³

- 1) Massa de lamas primárias espessadas (MS) + massa de lamas secundárias espessadas (MS)
- 2) Caudal de lamas primárias espessadas + caudal de lamas secundárias espessadas
- 3) Volume diário de lamas a digerir × tempo de retenção das lamas nos digestores
- 4) Considerando 2 digestores para a digestão anaeróbia das lamas
- 5) Volume unitário dos digestores ÷ altura dos digestores
- 6) Calculado a partir da área superficial unitária; arredondado por excesso às unidades

Para o funcionamento dos digestores anaeróbios definiu-se uma temperatura de 35 °C, sendo assim necessário fornecer calor ao sistema durante o período de digestão das lamas. Esse valor depende principalmente da energia necessária para o aquecimento das lamas e da energia dissipada pelas superfícies do reator. Nesta simulação definiu-se uma temperatura mínima das lamas à entrada do digestor de 12 °C e uma temperatura mínima do ar e do solo no exterior dos digestores de 10 °C.

Existem ainda outras perdas de energia ao longo do processo, que não sendo tão significativas se optou por contabilizar um fator de 10%, representando assim um rendimento de 90% em relação à energia térmica disponível.

Na tabela seguinte estão expostos os valores definidos e o cálculo final de energia necessária para o aquecimento dos digestores.

Tabela 11 - Cálculo das necessidades energéticas para o funcionamento dos digestores

Calor específico das lamas	4200	J/kg.°C
Coeficiente de transmissão de calor da cobertura superior dos digestores ⁻¹	1,59	W.m ² .°C
Coeficiente de transmissão de calor do fundo dos digestores ⁻¹	0,40	W.m ² .°C
Coeficiente de transmissão de calor das paredes de betão não enterradas ⁻¹	0,79	W.m ² .°C
Coeficiente de transmissão de calor das paredes de betão enterradas ⁻¹	0,68	W.m ² .°C
Percentagem de digestor enterrado	35	%
Perdas de calor pela superfície superior dos digestores ⁻²	1,380	GJ/d
Perdas de calor pelo fundo dos digestores ⁻²	0,345	GJ/d
Perdas de calor pelas paredes não enterradas ⁻²	0,357	GJ/d
Perdas de calor pelas paredes enterradas ⁻²	0,165	GJ/d
Calor necessário para manter as lamas à temperatura de funcionamento ⁻³	29,512	GJ/d
Calor necessário a fornecer ao digestor ⁻⁴	35,287	GJ/d
Calor necessário a fornecer ao digestor ⁻⁵	9.802	kW.h / d

- 1) Consultados em Metcalf & Eddy, 1991
- 2) Coeficiente de transmissão de calor × área × variação da temperatura
- 3) (Massa de lamas a digerir × calor específico das lamas × variação da temperatura) - perdas de calor pelas superfícies dos digestores
- 4) Considerando uma eficiência na transmissão de calor de 90%
- 5) Considerando um fator de conversão de $3,6 \times 10^6$ J/ kW.h

O biogás produzido é o subproduto mais valioso da digestão anaeróbia das lamas devido ao seu elevado poder energético, consequente da elevada percentagem do gás metano na sua constituição.

De seguida apresentam-se os cálculos relativos à produção de biogás e à energia disponível para posterior valorização num sistema de digestão anaeróbia com estas características.

Tabela 12 - Cálculo da energia disponível no biogás produzido na digestão anaeróbia das lamas

Fração de sólidos voláteis ⁻¹	73,6	%
Percentagem de sólidos voláteis destruídos durante a digestão	55	%
Produção específica de biogás	0,8	m ³ /kg VS
Produção de biogás ⁻²	5.339	m ³ /d
Valor energético do metano	35800	kJ/m ³
Percentagem de metano no biogás produzido	60	%
Valor energético do biogás produzido ⁻³	114,7	GJ/d

- 1) (Massa de sólidos voláteis nas lamas primárias + massa de sólidos voláteis nas lamas secundárias) ÷ massa total de sólidos nas lamas a digerir
- 2) Quantidade de lamas a digerir × fração de sólidos voláteis × % sólidos voláteis destruídos durante a digestão × produção específica de biogás
- 3) Produção de biogás × valor energético do metano × % metano no biogás

Para a valorização do biogás produzido são estudadas duas hipóteses, nomeadamente a utilização de um processo de cogeração (figura 17), com produção de energia elétrica e energia térmica, ou a utilização de uma caldeira (figura 18) para se aproveitar unicamente a energia térmica, produzida na combustão do biogás.

A utilização de um processo de cogeração tem a vantagem de produzir energia elétrica que em caso de venda à rede poderá representar uma mais-valia financeira muito significativa para a entidade responsável pela exploração da ETAR. A opção de vender a energia à rede prende-se com o facto de se comercializar esta energia em regime especial de bonificação, visto se tratar de um recurso renovável, e de se conseguir produzir a energia em horas de maior consumo, onde o preço é mais elevado. A cogeração permite também a produção de calor que, para além de ser aproveitado para o aquecimento dos digestores anaeróbios, pode ser utilizado noutros sistemas de tratamento da ETAR que necessitem de energia térmica para o seu funcionamento.

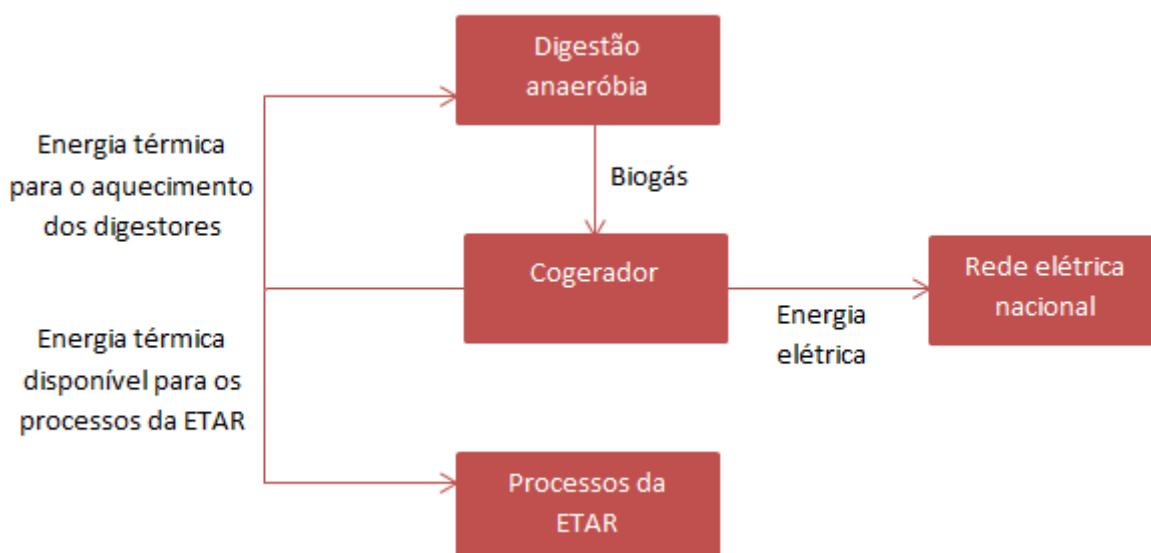


Figura 17 - Valorização do biogás num sistema de cogeração

A utilização de uma caldeira com o aproveitamento apenas da energia térmica do biogás é um sistema com uma eficiência relativamente elevada. Esta opção pode representar uma solução viável nos casos em que haja uma elevada necessidade de calor nos processos de tratamento, como é o caso da secagem térmica das lamas.

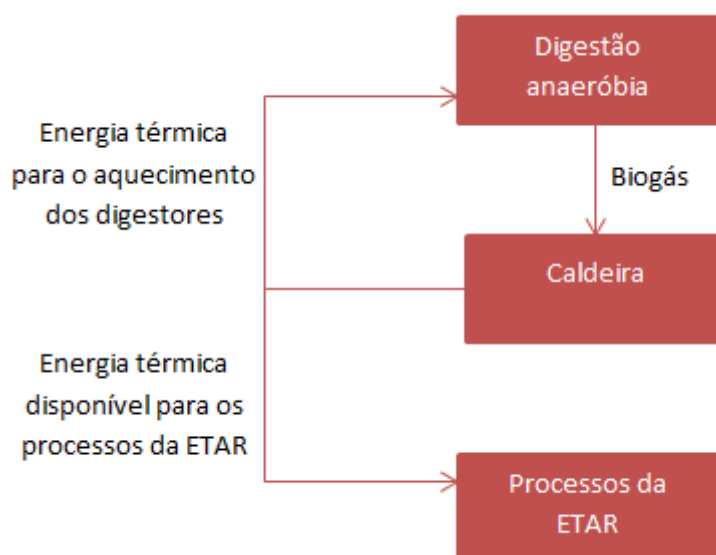


Figura 18 - Valorização térmica do biogás numa caldeira

Nas tabelas 13 e 14 apresentam-se os resultados relativos à produção de energia nas duas hipóteses propostas.

Tabela 13 - Produção de energia elétrica e energia térmica no sistema de cogeração

Eficiência na produção de eletricidade	30	%
Produção de energia elétrica ⁻¹	34,4	GJ/d
Produção de energia elétrica ⁻²	9.557	kW.h/d
Eficiência na produção de energia térmica	50	%
Produção de energia térmica ⁻³	57,3	GJ/d
Produção de energia térmica ⁻⁴	15.928	kW.h/d
Energia térmica disponível após o aquecimento dos digestores ⁻⁵	6.126	kW.h/d

- 1) Valor energético do biogás × eficiência de conversão
- 2) Considerando um fator de conversão de $3,6 \cdot 10^6$ J/ kW.h
- 3) Valor energético do biogás × eficiência de conversão
- 4) Considerando um fator de conversão de $3,6 \cdot 10^6$ J/ kW.h
- 5) Energia térmica produzida - energia necessária para o aquecimento dos digestores

Tabela 14 - Produção de energia térmica no sistema de combustão do biogás em caldeira

Eficiência na produção de térmica	85	%
Produção de energia térmica ⁻¹	97,5	GJ/d
Produção de energia térmica ⁻²	27.077	kW.h/d
Energia térmica disponível após o aquecimento dos digestores ⁻³	17.275	kW.h/d

- 1) Valor energético do biogás × eficiência de conversão
- 2) Considerando um fator de conversão de $3,6 \cdot 10^6$ J/ kW.h
- 3) Energia térmica produzida - energia necessária para o aquecimento dos digestores

Os valores apresentados permitem compreender a importância da utilização de sistemas de tratamento de lamas com consumos energéticos reduzidos, e principalmente o impacto da valorização do biogás num sistema de digestão anaeróbia numa ETAR com estas dimensões. Com estas opções consegue-se, em teoria, um balanço energético positivo relativamente ao tratamento da fase sólida nas ETARs.

8 Simulação de Cenários para o destino final das Lamas produzidas

8.1 Cenário 1

8.1.1 Descrição

Neste cenário estuda-se a opção de contratar uma empresa especializada para o encaminhamento das lamas para valorização agrícola. Os serviços contratados, para além das operações de transporte e valorização, incluem também o armazenamento temporário das lamas até que estejam reunidas as condições de deposição no solo.

Em Portugal, esta é a opção mais comum por parte das ETARs que pretendem realizar a valorização agrícola das lamas produzidas, passando as responsabilidades para a empresa contratada mediante o pagamento de uma taxa específica por tonelada de lama que se pretende enviar para valorização.

Para as lamas poderem ser utilizadas como fertilizante na agricultura devem cumprir os parâmetros definidos no Decreto-Lei nº 276/2009, no entanto, normalmente o cumprimento dos valores limite definidos não representa um problema devido à natureza doméstica dos efluentes a tratar (*Costa et al, 2002*).

Para além dos tratamentos de espessamento, digestão anaeróbia e desidratação, nesta simulação opta-se por realizar também a estabilização química das lamas através da adição de cal. Com esta opção pretende-se diminuir a emissão de odores e controlar o desenvolvimento de microrganismos patogénicos nas lamas desidratadas, durante o período de armazenamento.

8.1.2 Estabilização química das lamas

A estabilização química das lamas através da adição de cal é um processo simples, que permite impedir que as lamas entrem em putrefação no período de armazenamento até estarem reunidas as condições de deposição no solo.

Este processo tem especial importância no caso de existirem solos com elevados índices de acidez, podendo assim as lamas estabilizadas com cal representar um eficaz corretor de pH para futura exploração agrícola desses terrenos.

A adição de cal implica um aumento da quantidade de lamas a enviar para destino final. Esta característica tem especial importância no caso em estudo, uma vez que a produção de lamas

é muito elevada, necessitando-se assim de uma quantidade significativa de cal para se proceder à sua estabilização.

Neste cenário define-se a adição específica de 190 gramas de hidróxido de cálcio (cal hidratada) por cada quilograma de matéria seca nas lamas desidratadas (Metcalf & Eddy, 1991). Na tabela seguinte apresentam-se os resultados relativos à necessidade de cal hidratada e à produção de lamas para valorização agrícola.

Tabela 15 - Estabilização química das lamas desidratadas

Matéria seca nas lamas desidratadas	9.123	kg MS/d
Produção de lamas desidratadas	41.469	kg/d
Necessidades de hidróxido de cálcio ⁻¹	1.733	kg Ca(OH) ₂ /d
Produção total de lamas após a estabilização química ⁻²	43.203	kg/d

- 1) Considerando uma adição específica de 190 g Ca(OH)₂ / kg MS
- 2) Massa de lamas desidratadas + massa de hidróxido de cálcio adicionado

Da análise da tabela apresentada, verifica-se a necessidade de adicionar diariamente cerca de 1733 quilogramas de cal hidratada às lamas. Esta adição, para além do custo direto associado à exploração do sistema de estabilização química, tem impacto nos custos relativos à valorização agrícola, uma vez que a quantidade de lamas produzidas é superior.

8.1.3 Custos

O principal custo associado à estabilização química é relativo à aquisição de cal viva, (CaO), que tem um preço de mercado de cerca de 100 euros por tonelada. A formação de cal hidratada (Ca(OH)₂) a partir de cal viva está descrita na seguinte equação.



A partir da estequiometria relativa à equação apresentada, e tendo em conta a utilização diária de cerca de 1733 kg de cal hidratada, estima-se a necessidade de adquirir cerca de 1312 kg de cal viva por dia para realizar a estabilização química das lamas.

Os custos de investimento associados à estabilização química das lamas podem ser considerados desprezáveis, contudo este processo exige alguma manutenção e um consumo energético que devem ser contabilizados.

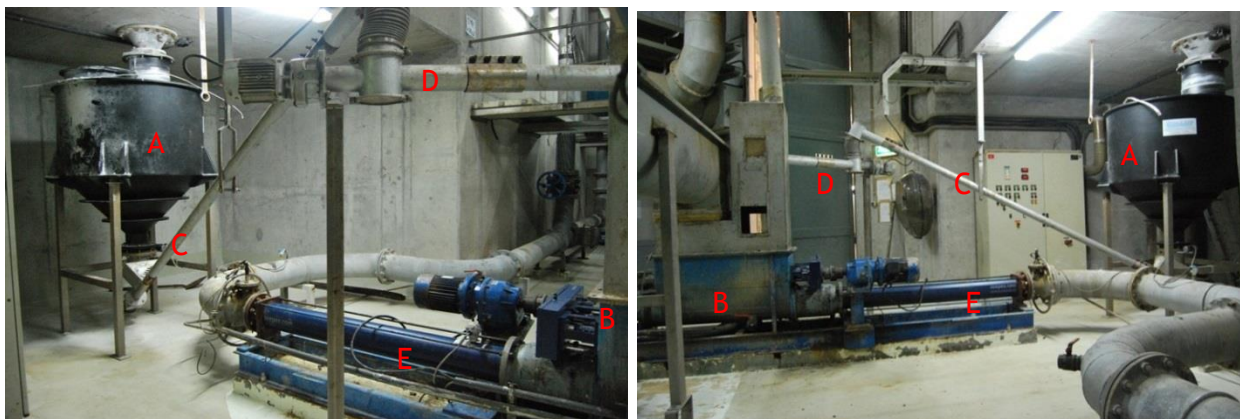


Figura 19 - Equipamentos necessários para a estabilização química das lamas

A: tremonha de alimentação instalada em baixo do silo de cal

B: misturador mecânico

C: bomba do tipo parafuso sem fim para elevação de cal

D: doseador de cal do tipo parafuso sem fim

E: bomba para elevação de lamas com cal para silo de armazenamento

Da análise da figura 19 verifica-se que apenas se necessita de energia elétrica para sistemas de bombagem (C, D e E) e na mistura entre as lamas e a cal (B). Mais à frente, no estudo das emissões de GEE relativas a este cenário (subcapítulo 8.1.4) pode-se verificar, como seria de esperar, que o consumo específico de energia elétrica na estabilização química das lamas é consideravelmente mais reduzido em relação às tecnologias de tratamento da fase sólida já abordadas ao longo desta dissertação.

A manutenção dos equipamentos neste processo é também relativamente reduzida, uma vez que as características alcalinas da mistura da cal com as lamas diminuem a corrosão nas condutas. Por outro lado, é importante referir que a elevação das lamas com cal para o silo de armazenamento é efetuada a pressão elevada, o que associado ao facto da adição de cal diminuir o poder lubrificante conferido pelos polímeros adicionados na desidratação das lamas, aumenta o efeito abrasivo nas paredes das condutas, podendo existir regularmente a necessidade de substituição. Assim sendo, e devido à dificuldade de se obter os dados relativos aos custos de exploração na estabilização química das lamas, definiu-se que na prática estes custos representam 10% do custo de aquisição de cal viva.

A contratação de serviços especializados para o encaminhamento das lamas, é concretizada através do pagamento de uma taxa por cada tonelada de lama enviada para valorização agrícola. Esta taxa tem já em conta o transporte e a necessidade de armazenamento prévio das lamas até que estejam reunidas as condições de deposição.

Para a determinação dos custos associados à valorização agrícola das lamas recolheram-se várias informações associadas a esta opção de destino final. Os valores recolhidos apontam para uma variação da taxa específica entre 25 e 35 euros por tonelada de lama. Neste cenário adotou-se um valor médio (30 euros por tonelada de lama) para o desenvolvimento da estimativa de custos associada ao encaminhamento das lamas para valorização agrícola.

Na tabela seguinte apresentam-se os custos associados a este cenário de destino final das lamas produzidas na ETAR em estudo.

Tabela 16 - Custos relativos ao cenário 1

Necessidade de cal viva para realizar a estabilização química das lamas	1.312	kg CaO/d
Custos de aquisição de cal viva ⁻¹	47.880	€/ano
Custos energéticos e de manutenção dos equipamentos ⁻²	4.788	€/ano
Custos de exploração relativos à estabilização química das lamas ⁻³	52.668	€/ano
Produção total de lamas a enviar para valorização agrícola	43.203	kg/d
Custo a pagar à entidade responsável pela valorização agrícola das lamas ⁻⁴	473.068	€/ano

- 1) Considerando um preço de mercado da cal viva de 100 euros por tonelada
- 2) Considerando que estes custos representam 10 % do custo de aquisição de cal viva
- 3) Custos de aquisição de cal viva + custos energéticos e de manutenção dos equipamentos
- 4) Produção de lamas × taxa específica para o encaminhamento das lamas

Da análise dos valores apresentados, observa-se que o encaminhamento das lamas para valorização agrícola tem um impacto muito mais significativo nos custos finais do que o processo de estabilização química. Este valor deve-se à elevada quantidade de lamas produzidas e à taxa a pagar pelo encaminhamento para valorização agrícola. Assim sendo, torna-se importante desenvolver esforços para minimizar a quantidade de lamas produzidas nos processos da ETAR, e encontrar alternativas de valorização economicamente mais interessantes.

8.1.4 Emissões de GEE

As necessidades energéticas relativas a este cenário têm em conta a energia necessária para a estabilização química das lamas e o seu encaminhamento para destino final, desde o local de produção até aos terrenos agrícolas onde se realiza a deposição final.

A UE, através do documento *Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge* de 2001, define um consumo específico relativo à estabilização química das lamas de 5 kW·h de energia

elétrica por cada tonelada de matéria seca. Este valor deve-se à necessidade de energia para a bombagem e mistura das lamas com a cal (EC, 2001). O fator de emissão utilizado foi de 0,323 quilogramas de CO₂ equivalente por kW·h consumido, relativo ao desempenho do grupo EDP no ano de 2012 (EDP, 2013).

O encaminhamento das lamas, depois do processo de calagem, é realizado em camiões com uma capacidade de transporte de 20 toneladas, da responsabilidade da empresa contratada para realizar a valorização das lamas. O fator de emissão relativo ao transporte de lamas com estas características é de 0,00025 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de lama transportada e quilómetro percorrido (Lifecarbondtool, 2013).

De referir que no cálculo das emissões de GEE relativas ao transporte das lamas desde a ETAR até aos locais de armazenamento temporário e destes até aos terrenos de deposição, considera-se uma única etapa, definindo-se uma distância total média de 50 quilómetros. Este valor tem em conta a predominância de solos ácidos no norte de Portugal (APA, 1980), onde as lamas estabilizadas com cal poderiam funcionar como corretor de pH.

Nas tabelas seguintes apresentam-se os cálculos relativos às emissões de GEE referentes a este cenário.

Tabela 17 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao consumo de energia elétrica na estabilização química das lamas

Consumo de energia específico	5	kW·h / t MS
Consumo de energia real	45,6	kW·h/d
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻¹	0,015	t CO ₂ eq/d

1) Considerando um fator de emissão de 0,323 kg CO₂ eq / kW.h

Tabela 18 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte das lamas para os terrenos de deposição final

Distância percorrida	50	km
Quantidade de lamas transportadas	43,20	t/d
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻¹	0,540	t CO ₂ eq / d

1) Considerando um fator de emissão de 0,00025 t CO₂ eq / t.km

Da análise das tabelas anteriores, atenta-se que as emissões de GEE relativas ao processo de estabilização química das lamas são desprezáveis em comparação com as emissões associadas ao transporte das lamas para valorização agrícola.

8.2 Cenário 2

8.2.1 Descrição

A compostagem das lamas permite estabilizar e higienizar as lamas devido às temperaturas relativamente elevadas, características da degradação aeróbia da matéria orgânica. Este processo representa uma forma de melhorar a qualidade das lamas que não apresentem condições para serem diretamente aplicadas nos solos agrícolas.

Neste cenário estuda-se a possibilidade de enviar as lamas desidratadas para uma central de compostagem da fração orgânica dos RSU. As centrais de compostagem são cada vez mais frequentes para o tratamento de resíduos orgânicos em Portugal, devido às metas estabelecidas para a minimização dos resíduos que são enviados para aterro sanitário. Devido às dificuldades de se fazer a recolha seletiva da fração orgânica dos resíduos, as instalações de compostagem estão muitas vezes sobredimensionadas, podendo assim existir a possibilidade de se estabelecer relações de simbiose entre a ETAR e a entidade responsável pela gestão dos RSU.



Figura 20 - Central de Valorização Orgânica da Lipor (adaptado de Lipor)

Esta opção permite contornar dois dos maiores problemas das ETARs ao nível da valorização agrícola das lamas produzidas, nomeadamente o armazenamento prévio das lamas até que estejam reunidas as condições de deposição e a necessidade de encontrar terrenos agrícolas com disponibilidade para receber as lamas, que cumpram os requisitos legais.

Para se desenvolverem as condições de compostagem necessárias, o pH das lamas deve-se encontrar próximo da neutralidade, não se recorrendo por isso à adição de cal para a estabilização química. Assim sendo, é necessário proceder-se a um controlo ainda mais rigoroso do processo de digestão anaeróbia, de forma a impedir que as lamas desidratadas sejam uma fonte de emissão de odores desagradáveis durante o período de armazenamento e transporte para a central de compostagem.

8.2.2 Custos

Para esta simulação define-se uma distância de 15 km entre a ETAR e a central de compostagem de RSU. De facto, devido ao crescente aumento das centrais de valorização orgânica, esta situação de proximidade é muito comum na zona norte de Portugal.

As lamas são transportadas da ETAR até à central de compostagem em camiões com uma capacidade de 20 toneladas. O custo de mercado associado a este tipo de transporte é de aproximadamente 0,1 euros por cada tonelada de lama transportada e quilómetro percorrido.

Uma vez que a co-compostagem de lamas de ETARs e RSU não é uma prática utilizada em larga escala no nosso país, tornou-se difícil obter um valor para a taxa a pagar à entidade gestora da central de compostagem pelas lamas recebidas. Para isso consultaram-se os custos de exploração médios das centrais de valorização orgânicas em funcionamento em Portugal. A ERSAR define que os custos de exploração médios variam entre 15 e 8 euros por tonelada em centrais de média/elevada dimensão (ERSAR, 2010). Assim, tendo em conta estes custos de exploração e a necessidade de amortizar o investimento realizado na central de valorização, parece razoável estabelecer uma taxa de 25 euros por cada tonelada de lama enviada para compostagem.

Na tabela seguinte apresentam-se os valores referentes aos custos de transporte e envio das lamas para compostagem conjunta com os RSU.

Tabela 19 - Custos relativos ao cenário 2

Lamas a enviar para a central de compostagem de RSU	41,469	kg/d
Número de viagens anuais ⁻¹	757	-
Custo relativo ao transporte das lamas ⁻²	22.710	€/ano
Custo a pagar à entidade responsável pela compostagem dos RSU ⁻³	378.406	€/ano

- 1) Produção anual de lamas ÷ capacidade de transporte dos veículos
- 2) Número de viagens anuais × custo específico de transporte × distância percorrida × capacidade de transporte dos veículos
- 3) Produção anual de lamas × taxa a pagar à entidade responsável pela central de compostagem

Da análise da tabela anterior verifica-se que os custos associados ao transporte das lamas são significativamente mais reduzidos em relação aos custos a pagar à entidade responsável por realizar a compostagem conjunta das lamas e dos resíduos. Esta diferença permite concluir que esta opção pode ser viável mesmo em situações onde as ETARs e as centrais de compostagem não têm relações de proximidade tão fortes.

8.2.3 Emissões de GEE

No estudo das emissões de GEE relativas ao consumo de energia neste cenário, tem-se em conta 3 fases distintas, nomeadamente o transporte das lamas da ETAR até à central de valorização orgânica, o consumo de energia elétrica relativo à compostagem das lamas e por fim o transporte do composto produzido até aos locais de deposição no solo.

Como já foi referido, os camiões utilizados para o transporte das lamas tem uma capacidade de 20 toneladas. Assim sendo, e tal como no cenário anterior, utiliza-se um fator de emissão de 0,00025 toneladas de CO₂ equivalente por cada tonelada de lama transportada e quilómetro percorrido (*Lifecarbontool*, 2013).

O consumo elétrico da central de compostagem foi estimado tendo em conta um consumo específico de 25 kW·h por tonelada de lama a tratar, consultado e transposto do livro *Integrated Solid Waste Management: a life cycle inventory*, de 2001. Mais uma vez, neste cenário utiliza-se o fator de emissão relativo à energia elétrica de 0,323 quilogramas de CO₂ equivalente por kW.h consumido (*EDP*, 2013).

O encaminhamento do composto produzido para os locais de valorização não é da responsabilidade da ETAR, no entanto os impactos ambientais associados a este transporte devem ser contabilizados para a comparação entre os diferentes cenários. Para este cálculo define-se uma diminuição de volume das lamas de 60%, e uma densidade final do composto de cerca de 600 kg/m³.

Na tabela seguinte apresentam-se os cálculos relativos à quantidade de composto produzido com a compostagem das lamas, assim como as percentagens de venda do composto ensacado e a granel.

Tabela 20 - Cálculo da produção de composto e políticas de comercialização adotadas

Quantidade de lamas a enviar para compostagem	41.469	kg/d
Volume de lamas a enviar para compostagem	39,0	m ³ /d
Volume de composto produzido ⁻¹	15,6	m ³ /d
Massa de composto produzido ⁻²	9.370	kg/d
Percentagem de composto vendido a granel	50	%
Percentagem de composto vendido ensacado	50	%

- 1) Considerando uma redução de volume total de 60%
- 2) Considerando uma densidade do composto de 600 kg/m³

A distribuição e venda do composto a granel realiza-se em camiões com capacidade de transporte de 10 toneladas. Este serviço destina-se a grandes consumidores, estimando-se com isso um percurso médio de 50 quilómetros. O fator de emissão utilizado é de 0,00052 toneladas de CO₂ equivalente por cada tonelada de lama transportada e quilómetro percorrido (*Lifecarbontool*, 2013).

A comercialização do composto ensacado tem como destino pequenos consumidores, esperando-se uma menor necessidade de recorrer a grandes distâncias para se realizar a sua distribuição. Assim sendo, estima-se uma distância média de 20 quilómetros, e a utilização de carrinhas com capacidade de transportar 3,5 toneladas de composto. Para este cálculo o fator utilizado é de 0,00153 toneladas de CO₂ equivalente por cada tonelada de lama transportada e quilómetro percorrido (*Lifecarbontool*, 2013).

De seguida apresentam-se as tabelas relativas aos cálculos das emissões equivalentes de CO₂ nas diferentes fases definidas nesta simulação.

Tabela 21 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte das lamas para a central de compostagem

Distância percorrida	15	km
Quantidade de lamas transportadas	41,5	t
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻¹	0,156	t CO ₂ eq/d

1) Considerando um fator de emissão de 0,00025 t CO₂ eq / t.km

Tabela 22 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao consumo de energia elétrica na central de compostagem

Consumo de energia específico	25	kW.h/t lama
Consumo de energia real	1036,7	kW.h/d
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻¹	0,335	t CO ₂ eq/d

1) Considerando um fator de emissão de 0,323 kg CO₂ eq / kW.h

Tabela 23 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte do composto a granel até aos consumidores finais

Composto vendido a granel	4,7	t/d
Distância percorrida	50	km
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻¹	0,122	t CO ₂ eq / d

1) Considerando um fator de emissão de 0,00052 t CO₂ eq / t.km

Tabela 24 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte do composto ensacado até aos consumidores finais

Composto vendido em sacos	4,7	t/d
Distância percorrida	20	km
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻¹	0,143	t CO ₂ eq/d

1) Considerando um fator de emissão de 0,00153 t CO₂ eq / t.km

As emissões equivalentes de CO₂ são da mesma ordem de grandeza nas diferentes etapas deste cenário. De salientar que ao nível do encaminhamento das lamas observa-se que as emissões são mais reduzidas quanto maior é a capacidade de transporte dos veículos utilizados, devendo por isso se otimizar as rotas de distribuição do composto, de forma a possibilitar que este encaminhamento seja realizado em veículos de maiores dimensões.

Mais uma vez, é de referir que os valores apresentados têm apenas em consideração as emissões relativas ao consumo de energia elétrica e ao transporte das lamas, não se contabilizando as emissões consequentes da degradação das lamas no processo de compostagem.

8.3 Cenário 3

8.3.1 Descrição

Nas proximidades das ETARs, nem sempre existem sistemas de compostagem em funcionamento e com capacidade para tratar outro tipo de resíduos. Nestes casos, as ETARs podem desenvolver infraestruturas próprias para realizar a compostagem das lamas. A construção de uma central de compostagem tem elevados custos de investimento e exploração, no entanto, a comercialização do composto produzido pode representar uma fonte de receitas importantes na amortização do investimento efetuado.

A existência de mercado para o composto é um dos principais problemas desta solução, uma vez que dela depende toda a sustentabilidade do projeto. Assim, devem ser tomadas medidas para que se consiga controlar a qualidade do composto produzido e maximizar o fluxo de saída (venda).

Neste cenário, será dimensionada uma central de compostagem de lamas nas instalações da ETAR. Como material estruturante será utilizado um refugo proveniente de uma indústria de madeira nas proximidades, que servirá para se atingir a razão C/N e as condições de humidade pretendidas. A realização da compostagem nas instalações da ETAR permite o tratamento direto das lamas desidratadas, tornando desnecessário o transporte por veículos e recorrer a processos de estabilização química.

As centrais de compostagem necessitam de elevadas áreas de terreno para a implementação das tecnologias pretendidas. Neste estudo define-se que existe espaço suficiente nas instalações da ETAR, no entanto, na fase de dimensionamento são tomadas algumas medidas de forma a reduzir a área total destinada à central de compostagem.

8.3.2 Dimensionamento da Central de Compostagem

O dimensionamento da central de compostagem de lamas, para além do cálculo da área de terreno, inclui a quantificação de material estruturante para se obterem as condições ótimas de funcionamento do processo. A adição de um material estruturante deve-se ao facto das lamas apresentarem elevados níveis de humidade e de azoto, em relação às condições ideais para o desenvolvimento dos microrganismos aeróbios.

Normalmente o material estruturante utilizado é a casca de pinheiro e o serrim, uma vez que estes materiais têm reduzidos índices de humidade e teores elevados de matéria carbonácea, permitindo compensar os valores apresentados pelas lamas. Este tipo de material tem também a vantagem de poder ser adquirido a custos relativamente baixos quando representa um refugo consequente de uma atividade industrial.

Para garantir que a mistura entre as lamas e o material estruturante atinja as condições pretendidas, torna-se indispensável fazer a caracterização destes materiais (tabelas 25 e 26).

Tabela 25 - Caracterização das lamas desidratadas produzidas na ETAR

Humidade	78	%
Razão C/N ⁻¹	7,9	-
Densidade	1.062	kg/m ³
Percentagem de sólidos voláteis	55,7	%
Teor de lenhina ⁻²	6,9	%
Fração biodegradável da matéria orgânica ⁻³	0,64	-

- 1) Consultado em *Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge*, de 2001 da UE
- 2) Consultado em *The Science of Composting*, de 1997
- 3) 0,83 - (0,028 × % lenhina); Consultado em *The Practical Handbook of Compost Engineering*, de 1993

Tabela 26 - Caracterização do material estruturante utilizado na compostagem das lamas

Humidade	20	%
Razão C/N ⁻¹	99,0	-
Densidade	500	kg/m ³
Percentagem de sólidos voláteis	85,0	%
Teor de lenhina ⁻²	27,8	%
Fração biodegradável da matéria orgânica ⁻³	0,052	-

- 1) Consultado em *Química da Madeira*, de 2005
- 2) Consultado em *The Science of Composting*, de 1997
- 3) 0,83 - (0,028 × % lenhina); Consultado em *The Practical Handbook of Compost Engineering*, de 1993

De referir que os valores apresentados para o material estruturante são maioritariamente consultados na bibliografia, sendo que na prática estes valores variam consideravelmente consoante os diferentes materiais que podem ser adicionados às lamas.

A AEPSA define um intervalo ótimo relativo à razão C/N entre 20 e 30 (Levy *et al*, 2006), utilizando-se assim o valor médio deste intervalo para a realização da simulação da necessidade específica de material estruturante.

Na tabela seguinte são apresentados os resultados relativos à mistura entre as lamas e o material estruturante para o processo de compostagem.

Tabela 27 - Cálculo do volume diário de material a tratar na central de compostagem

Necessidade específica de material estruturante ⁻¹	0,79	kg/kg de lama
Volume de lama	39,0	m ³ /d
Massa de lamas desidratadas	41.469	kg/d
Massa do material estruturante ⁻²	32.671	kg/d
Volume do material estruturante ⁻³	65,3	m ³ /d
Volume total para compostagem ⁻⁴	104,4	m ³ /d

- 1) Material estruturante adicionado para se atingir o valor pretendido para a razão C/N (25)
- 2) Massa de lama desidratadas × necessidade específica de material estruturante
- 3) Considerando uma densidade de 500 kg/m³
- 4) Massa de lamas desidratadas + massa de material estruturante a adicionar

Da análise da tabela anterior, observa-se que o volume de material estruturante a adicionar à mistura é superior ao volume de lamas que será sujeito ao processo de compostagem.

O grau de humidade da mistura no processo de compostagem deve também ser conservado entre 40% e 60% (Levy *et al*, 2006). Tendo em conta as características dos materiais a tratar (tabelas 25 e 26) e as quantidades misturadas (tabela 27), o grau de humidade esperado ronda os 52% estando assim reunidas as condições de compostagem requeridas ao nível da humidade e da razão C/N.

Na prática nem sempre é fácil obter um compromisso entre estes dois parâmetros, sendo que nos casos em que o valor da humidade é demasiado reduzido pode-se adicionar água ao processo. Por outro lado, quando os valores da humidade estão acima do limite estimado deve-se proceder à seleção de um material estruturante com menores teores de humidade, ou em alternativa realizar uma secagem térmica das lamas, o que dificilmente pode representar uma opção viável devido à elevada quantidade de energia necessária neste processo.

A capacidade mínima relativa ao armazenamento temporário das lamas e do material estruturante deve ser de 2 e 7 dias, respetivamente. Este armazenamento não deve ultrapassar os 3 metros de altura, de forma a impedir que as lamas atinjam condições de degradação anaeróbia e sejam uma fonte de emissão de odores desagradáveis. Na tabela seguinte apresentam-se os valores da área necessária para o armazenamento das lamas e do material estruturante.

Tabela 28 - Cálculo da área necessária para o armazenamento das lamas desidratadas e do material estruturante

Área necessária para o armazenamento das lamas desidratadas	26,0	m ²
Área necessária para o armazenamento do material de estruturante	152,5	m ²

Tendo em conta os valores apresentados na tabela anterior e a necessidade de uma maior área disponível de armazenamento, em caso de paragem do processo de compostagem, adotou-se os valores de 45 e 175 m² para o armazenamento das lamas desidratadas e do material estruturante, respetivamente.

No processo de compostagem as lamas começam por uma fase de degradação ativa, de seguida o composto produzido passa por um processo de maturação e é armazenado até ser encaminhado para os consumidores finais.

A degradação ativa é caracterizada por uma intensa atividade microbiana onde é degradada grande parte da matéria orgânica presente nas lamas. Esta fase realiza-se em canais com 3 metros de largura, 3 metros de altura e 60 metros de comprimento, considerando-se uma duração de 21 dias. A utilização de canais permite conseguir tempos de retenção inferiores em relação a grande parte das alternativas de compostagem, possibilitando assim reduzir a área necessária para se efetuar a degradação ativa das lamas. Esta vantagem é muito significativa quando se pretende estabilizar uma grande quantidade de lamas, como se observa no caso em estudo. A utilização de canais nesta fase possibilita também controlar os parâmetros que afetam o processo de compostagem das lamas, permitindo o acesso visual e a recolha de amostras ao longo de todo o segmento dos canais. Com isto, obtém-se um composto de qualidade e que ganha mais facilmente a aceitação do mercado.

Após a degradação ativa das lamas, estas têm de passar por um processo de maturação onde são degradados os compostos mais complexos. A maturação do composto é realizada através de um sistema de pilhas arejadas, uma vez que esta fase de tratamento não necessita de um controlo tão apertado dos parâmetros do processo de compostagem. As pilhas têm 6 metros de largura, 3 metros de altura e 60 metros de comprimento, sendo distribuídas ao longo de longas plataformas horizontais que permitem o arejamento do composto a partir da base. A maturação das lamas é um processo mais demorado, estimando-se uma duração de 30 dias, no entanto, nesta fase as lamas já sofreram uma redução de volume na ordem dos 50%, consequente da intensa atividade microbiana na fase de degradação ativa.

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores relativos à área necessária relativa aos canais para degradação ativa das lamas e às pilhas para maturação do composto produzido na central de compostagem.

Tabela 29 - Cálculo da área necessária para a fase de degradação ativa das lamas

Volume necessário dos canais ⁻¹	2.192	m ³
Volume unitário dos canais ⁻²	540,0	m ³
Canais necessários ⁻³	5	-
Área necessária para os canais ⁻⁴	900	m ²
Área total para a estabilização ativa das lamas ⁻⁵	1140	m ²

- 1) Volume diário de mistura × tempo de retenção
- 2) Comprimento × largura × altura
- 3) Volume necessário para a degradação ativa ÷ volume unitário dos canais; arredondado por excesso
- 4) Área unitária dos canais × número de canais
- 5) Considerando um espessamento entre canais de 1 metro para operações de manutenção

Tabela 30 - Cálculo da área necessária para maturação do composto produzido

Volume de composto a maturar	52,2	m ³ /d
Volume necessário das pilhas ⁻¹	1.565,8	m ³
Volume unitário das pilhas ⁻²	360,0	m ³
Pilhas necessárias ⁻³	5	-
Área necessária para as pilhas ⁻⁴	1800	m ²
Área total para a maturação do composto ⁻⁵	2280	m ²

- 1) Volume diário de composto a maturar × tempo de retenção
- 2) (Comprimento × largura × altura) ÷ 3
- 3) Volume necessário para a maturação ÷ volume unitário das pilhas; arredondado por excesso
- 4) Área unitária das pilhas × número de pilhas
- 5) Considerando um espessamento entre pilhas de 2 metros para a operação dos equipamentos

Na fase de maturação a redução de volume esperada é da ordem dos 20%, representado assim uma produção de composto total de cerca de 42 m³ por dia. Tal como no cenário anterior espera-se uma comercialização de composto a granel de 50%, sendo que os restantes 50% são vendidos em sacos.

Por fim, são apresentadas as áreas relativas ao ensacamento e armazenamento do composto e ao edifício de controlo.

Tabela 31 - Áreas complementares da central de compostagem

Ensacamento	75	m ²
Armazenamento do composto para venda a granel	500	m ²
Armazém para composto ensacado	600	m ²
Edifício de controlo	800	m ²

Os dados apresentados ao longo deste subcapítulo, ajudam a perceber a ordem de grandeza de uma central de compostagem com estas características. A necessidade total de terreno implica ainda a necessidade de áreas neutras para operações de manutenção, controlo e movimentação de equipamentos.

O esquema de funcionamento da central de compostagem de lamas dimensionada neste cenário encontra-se apresentado na figura seguinte.



Figura 21 - Esquema de funcionamento da central de compostagem dimensionada

8.3.3 Custos

A construção de uma central de compostagem para o tratamento de lamas implica um elevado investimento inicial e custos de exploração significativos. Para fazer a estimativa destes custos utilizaram-se valores retirados da bibliografia.

A FCCA estima que os custos de investimento numa central de compostagem, com estas características, variam entre 220 e 510 euros por tonelada de matéria seca anual a tratar (FCCA, 2000). O valor adotado foi de 350 euros por tonelada de matéria seca anual. Este valor teve em consideração alguns exemplos práticos já estudados em Portugal, assim como a possibilidade de se obter economias de escala numa central de compostagem com estas dimensões.

O mesmo artigo prevê uma variação dos custos de exploração relativos às centrais de compostagem entre 60 e 140 euros por tonelada de matéria seca (FCCA, 2000). Estes valores são significativamente superiores aos verificados no cenário anterior onde, as lamas eram sujeitas a compostagem em conjunto com a fração orgânica dos RSU. Esta diferença deve-se essencialmente à necessidade de material estruturante, quando se pretende fazer a compostagem dedicada das lamas. Posto isto, e tendo em conta a possibilidade de utilizar um material estruturante resultante de processos industriais e adquirido a custos relativamente reduzidos, estima-se um custo de exploração específico de 80 euros por tonelada de matéria seca a tratar na central de compostagem.

A comercialização do composto produzido pode representar um importante fator de sustentabilidade financeira da central de compostagem das lamas. Esta comercialização espera-se que seja efetuada a preços de mercado, que em Portugal rondam os 8 cêntimos por litro.

O sucesso relativo à venda do composto está sujeito a várias incertezas, sendo de realçar a necessidade de aceitação de mercado para uma eficaz comercialização. Para isso devem ser tornadas públicas as operações realizadas na central de compostagem, assim como controlar eficazmente os parâmetros do processo maximizando a qualidade final do composto.

Na tabela seguinte apresentam-se os valores relativos aos custos de investimento e exploração na central de compostagem, assim como o valor esperado de receitas decorrentes da comercialização do composto produzido.

Tabela 32 - Custos relativos ao cenário 3

Massa de matéria seca para compostagem ⁻¹	12.881	t MS / ano
Custos de investimento estimados ⁻²	4.966.938	€
Custos de exploração estimados ⁻³	1.135.300	€/ano
Produção anual de composto	15.240	m ³ /ano
Receitas relativas à comercialização do composto produzido ⁻⁴	1.219.205	€/ano

- 1) (Massa de lama + massa de material estruturante) × teor de sólidos da mistura
- 2) Massa de matéria seca anual para compostagem × custo específico de investimento adotado
- 3) Massa de matéria seca para compostagem × custo específico de exploração adotado
- 4) Produção de composto × preço estimado para a comercialização do composto

Os custos de investimento são elevados, o que seria de esperar tendo em conta as dimensões apresentadas para a central de compostagem e a necessidade de maquinaria para o funcionamento deste processo de estabilização biológica das lamas. Este valor implica um risco financeiro elevado, devendo-se por isso recorrer a estudos de mercado criteriosos.

Da análise da tabela 32, verifica-se que a comercialização do composto permite financiar os custos de exploração decorrentes do funcionamento da central de compostagem das lamas. Importa referir que para além de não ser um dado adquirido que todo o composto produzido tem mercado, a produção estimada baseia-se nos dados de projeto esperando-se valores mais reduzidos se a produção de lamas for inferior, o que acontece se a ETAR não estiver a trabalhar na capacidade máxima.

8.3.4 Emissões de GEE

Neste cenário, o cálculo das necessidade energéticas considera duas fases, nomeadamente o consumo de energia elétrica nas instalações da central de compostagem e o encaminhamento do composto produzido para os consumidores finais.

O consumo de energia específico na central de compostagem foi obtido utilizando dados práticos relativos a tecnologias semelhantes às projetadas no dimensionamento realizado neste cenário. O valor estimado foi 35 kW.h por tonelada de lama a estabilizar, representando um consumo específico bastante superior ao utilizado no caso da central de compostagem de RSU (cenário 2). Mais uma vez, este facto pode ser explicado tendo em conta a necessidade de material estruturante para a compostagem dedicada das lamas, o que faz aumentar consideravelmente as necessidades de ar e a área necessária para a implementação desta tecnologia.

Os estudos de mercado apontam para uma necessidade equivalente de composto a granel e de composto ensacado, sendo por isso comercializados em quantidades idênticas. Tal como no cenário anterior, o composto a granel é transportado em veículos com uma capacidade de transporte de 10 toneladas, estimando-se um percurso médio de 50 quilómetros. Por outro lado, o composto ensacado percorre em média apenas 20 quilómetros, utilizando-se veículos com uma capacidade de transporte de 3,5 toneladas para realizar este encaminhamento.

Nas tabelas seguintes são apresentados os valores referentes à emissão de GEE relativos a este cenário de destino final de lamas de ETAR.

Tabela 33 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao consumo de energia elétrica na central de compostagem

Consumo de energia específico	35	kW.h / t lama
Consumo de energia real	1451,4	kW.h / d
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻¹	0,469	t CO ₂ eq / d

1) Considerando um fator de emissão de 0,323 kg CO₂ eq / kW.h

Tabela 34 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte do composto a granel até aos consumidores finais

Composto vendido a granel ⁻¹	12,5	t / d
Distância percorrida	50	km
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻²	0,326	t CO ₂ eq / d

1) Considerando uma densidade do composto de 600 kg/m³

2) Considerando um fator de emissão de 0,00052 t CO₂ eq / t.km

Tabela 35 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte do composto ensacado até aos consumidores finais

Composto vendido em sacos ⁻¹	12,5	t / d
Distância percorrida	20	km
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻¹	0,383	t CO ₂ eq / d

1) Considerando uma densidade do composto de 600 kg/m³

2) Considerando um fator de emissão de 0,00153 t CO₂ eq / t.km

Da análise dos valores apresentados observa-se que neste cenário, e tal como na compostagem conjunta das lamas com a fração orgânica dos RSU (cenário 2), a ordem de grandeza das emissões relativas às diferentes fases são semelhantes, salientando-se também, que devido à localização da central de compostagem nas instalações da ETAR, não existem emissões decorrentes do transporte das lamas até ao local de tratamento.

8.4 Cenário 4

8.4.1 Descrição

Em Portugal existem em funcionamento algumas centrais de incineração de resíduos, que podem representar uma alternativa ao destino final das lamas que são enviadas para aterro. Uma das vantagens da incineração é que não existe a necessidade de um controlo tão apertado da composição química das lamas como quando se pretende realizar a valorização agrícola. Esta opção é assim muito útil no caso de existir a necessidade da ETAR tratar efluentes industriais com uma elevada carga de poluentes químicos, o que impediria desde logo a aplicação das lamas na agricultura.



Figura 22 - Central de incineração da Lipor (adaptado de Lipor)

Por outro lado, a incineração necessita de um elevado controlo das emissões gasosas consequentes do processo de combustão. Os parâmetros que devem ser respeitados ao nível dos gases produzidos constam do DL nº 85/2005, que unifica o quadro aplicável relativamente às tecnologias de incineração e co-incineração para a eliminação de resíduos.

Neste cenário estuda-se a hipótese de encaminhar as lamas para uma incineradora de RSU já em funcionamento, o que possibilita contornar os elevados custos de investimento característicos dos processos de incineração. Apesar do objetivo principal ser a redução da quantidade de resíduos enviados para aterro, as centrais de incineração de RSU têm também o objetivo de produzir energia elétrica a partir da energia térmica produzida nos processos de combustão. Assim sendo é importante garantir que as lamas não tenham índices de humidade muito elevados, que afetem a eficiência do processo.

Apesar de terem uma elevada quantidade de matéria volátil, a combustão das lamas apenas atinge condições autogéneas quando o teor de sólidos é superior a 35% (Sousa, 2005). Para se obterem estes valores realiza-se uma secagem térmica das lamas nas instalações da ETAR. Esta secagem é responsável por um consumo de energia considerável, sendo por isso um assunto que deve ser analisado com bastante cuidado e onde várias alternativas devem ser estudadas.

8.4.2 Secagem térmica das lamas

As lamas desidratadas apresentam ainda uma reduzida concentração de sólidos para que possam ser enviadas para incineração. Para aumentar a concentração de sólidos nas lamas, estudam-se duas alternativas para realizar a secagem térmica, nomeadamente o calor produzido no sistema de cogeração de energia (figura 17) e a energia térmica resultante da combustão do biogás numa caldeira (figura 18).

No balanço energético relativo ao sistema de digestão anaeróbia (subcapítulo 7.3) calculou-se a produção de energia térmica nestas duas alternativas de valorização do biogás, representando-se de seguida os valores com interesse para esta simulação.

Tabela 36 - Propriedades das lamas desidratadas e energia disponível nas duas opções de valorização do biogás

Massa de matéria seca nas lamas desidratadas	9.123	kg MS / d
Concentração de sólidos nas lamas desidratadas	22	%
Quantidade de água nas lamas desidratadas ⁻¹	32.346	kg H ₂ O / d
Energia térmica disponível para a secagem das lamas - Cogeração ⁻²	6.126	kW.h / d
Energia térmica disponível para a secagem das lamas - Caldeira ⁻²	17.275	kW.h / d

1) Massa total de lamas - massa de matéria seca nas lamas

2) Calculado no subcapítulo 7.3

A produção de energia térmica através da combustão do biogás permite uma superior disponibilidade energética para o processo de secagem das lamas, no entanto, com esta opção de valorização não se produz eletricidade, ao contrário do que acontece com a alternativa de utilizar um cogrador de energia.

A secagem térmica permite uma remoção parcial da água presente nas lamas, não se alterando a massa de matéria seca ao longo do processo. A necessidade específica de energia para a evaporação da água tem vindo a diminuir, consequência da existência de equipamentos cada vez mais eficientes no mercado. A empresa *Degrémont* apresenta uma tecnologia, INNODRY® 2E, com um consumo específico de energia térmica entre 675 e 725 kW.h por cada tonelada de água evaporada (Degrémont, 2013). Nesta simulação adotou-se o valor médio deste intervalo.

Na tabela seguinte apresentam-se os resultados relativos à secagem térmica das lamas utilizando o calor resultante do processo cogeração de energia.

Tabela 37 - Produção de lamas após a secagem térmica, utilizando o calor disponível do processo de cogeração

Quantidade de água evaporada ⁻¹	8.751	kg H ₂ O / d
Quantidade de lamas para incineração ⁻²	32.718	kg / d
Concentração de sólidos após a secagem ⁻³	28	%

- 1) Considerando um consumo específico de 700 kW.h / t H₂O
- 2) Massa inicial de lamas - massa de água evaporada no processo de secagem térmica
- 3) Massa de matéria seca ÷ massa total de lamas para incineração

O grau de humidade conseguido com esta alternativa de secagem é ainda reduzido em relação ao que se pretende para a incineração das lamas. Assim sendo é necessário utilizar a energia térmica produzida na caldeira com a combustão do biogás (tabela 38).

Tabela 38 - Produção de lamas após a secagem térmica, utilizando o calor resultante da combustão do biogás em caldeira

Quantidade de água evaporada ⁻¹	24.678	kg H ₂ O / d
Quantidade de lamas para incineração ⁻²	16.791	kg / d
Concentração de sólidos após a secagem ⁻³	54	%

- 1) Considerando um consumo específico de 700 kW.h / t H₂O
- 2) Massa inicial de lamas - massa de água evaporada no processo de secagem térmica
- 3) Massa de matéria seca ÷ massa total de lamas para incineração

Como seria de esperar, com esta opção conseguem-se resultados muito mais significativos ao nível da secagem térmica das lamas. É de salientar também que a redução do teor de humidade permite uma considerável diminuição da quantidade de lamas que é enviada para incineração, podendo com isto se vir a minimizar o impacto de não se produzir eletricidade a partir do biogás produzido no processo de digestão anaeróbia.

8.4.3 Incineração

A incineração das lamas não é da competência da ETAR, no entanto devido à complexidade do processo opta-se por expor este assunto num capítulo separado das emissões de GEE relativas a este cenário.

Neste capítulo, utiliza-se a metodologia apresentada pelo documento *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal*, da EPA, para se estimar a energia térmica disponível para

produção de eletricidade, no processo de incineração das lamas. Para isso, começa-se por apresentar as características das lamas após o processo de secagem térmica a que foram sujeitas (tabela 39).

Tabela 39 - Composição aproximada das lamas a incinerar

Quantidade de lamas a incinerar	16.791	kg / d
Teor de humidade	45,7	%
Percentagem sólidos voláteis	30,2	%
Fração não combustível	24,1	%

Para se calcular a energia presente nas lamas considera-se que a matéria volátil tem a seguinte fórmula química: $C_{10}H_{19}O_3N$. Esta fórmula permite estimar as frações mássicas dos diferentes elementos, através dos quais se calcula o Poder Calorífico Superior (PCS) das lamas que se pretendem incinerar (tabela 40), utilizando a fórmula de *Dulong* (equação 2) (EPA, 1979).

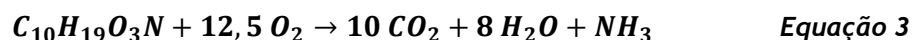
$$PCS \left(\frac{BTU}{lb} \right) = 14,544 C + 62,208 \left(H + \frac{O}{8} \right) + 4,050 S \quad \text{Equação 2}$$

Tabela 40 - Cálculo do poder calorífico superior das lamas

PCS específico da matéria volátil nas lamas ⁻¹	29,5	MJ / kg MV
PCS das lamas a incinerar ⁻²	150,1	GJ / d

- 1) Calculado a partir da fórmula de Dulong
- 2) Massa matéria volátil nas lamas × PCS específico da matéria volátil

A necessidade de ar para a combustão completa das lamas é estimada a partir da relação estequiométrica relativa à seguinte equação de dissociação da matéria volátil.



Considerando uma fração de 0,232 quilogramas de O_2 por quilograma de ar, as necessidades estequiométricas são de aproximadamente 8,6 quilogramas de ar por cada quilograma de matéria volátil presente nas lamas.

Nos sistemas de incineração é aconselhável existir um fator de excesso de ar de forma a garantir a combustão completa dos materiais que se pretendem incinerar. O fator adotado nesta simulação foi de 1,5, resultando assim numa necessidade diária de ar de aproximadamente 65 337 quilogramas.

A combustão das lamas é realizada a temperaturas elevadas, definindo-se neste estudo uma temperatura média de 1100 °C na combustão e de 20 °C à entrada do sistema de incineração. Na estimativa da energia disponível para a produção de eletricidade na incineração das lamas, é indispensável o cálculo das perdas de energia relacionadas com o ar que é adicionado, a humidade presente nas lamas e a água formada no processo de combustão. De referir, que nesta simulação se considerou desprezáveis as perdas relacionadas com a fase sólida presente no processo de incineração.

O ar é adicionado ao processo à temperatura ambiente (20 °C), sendo necessário considerar as perdas associadas ao aquecimento do ar seco e do vapor de água presente até às temperaturas de combustão no forno (1100 °C). Na tabela seguinte apresentam-se os cálculos relativos a estas perdas de energia.

Tabela 41 - Cálculo das perdas relativas ao ar adicionado para a combustão completa das lamas

Calor necessário para elevar a temperatura do ar seco ⁻¹	70,9	GJ/d
Pressão de saturação do vapor de água ⁻²	18,3	mm Hg
Pressão de vapor ⁻³	13,7	mm Hg
Humidade específica do ar à entrada ⁻⁴	0,011	kg água/kg ar
Calor necessário para elevar a temperatura do vapor de água no ar ⁻⁵	1,5	GJ/d

- 1) $\text{Massa de ar} \times \text{calor específico do ar} \times (T_{\text{combustão}} - T_{\text{inicial}})$;
Considerando $c_p \text{ ar} = 1005 \text{ J/kg/K}$
- 2) $10^{(a/T+b)}$;
Considerando $a=2238$; $b=8,896$; $T=293 \text{ K}$
- 3) $\text{Pressão de vapor} \times \text{Humidade relativa}$;
Considerando uma humidade relativa de 75%
- 4) $(18,015 \div 28,96) \times (\text{Pressão de vapor} \div (\text{Pressão atmosférica} - \text{Pressão de vapor}))$;
Considerando uma pressão atmosférica de 760 mm Hg
- 5) $\text{Massa de vapor de água no ar} \times \text{calor específico do vapor de água} \times (T_{\text{combustão}} - T_{\text{inicial}})$;
Considerando $c_p \text{ vapor de água} = 1912 \text{ J/kg/K}$

Como já foi referido, a humidade presente nas lamas é um fator muito importante nos processos de incineração, pois representa o principal parâmetro para determinar se a

combustão se consegue desenvolver sem a utilização de um combustível auxiliar. As perdas associadas à humidade das lamas estão representadas na tabela seguinte.

Tabela 42 - Cálculo das perdas relativas à humidade presente nas lamas

Calor necessário para elevar a água até à temperatura de vaporização ⁻¹	2,6	GJ / d
Calor necessário para evaporar a água ⁻²	18,8	GJ / d
Calor necessário para elevar a temperatura do vapor de água formado ⁻³	14,7	GJ / d

- 1) **Massa de água × calor específico da água × (T evaporação - T inicial);**
Considerando c_p água = 1005 J/kg/k; T evaporação = 100 °C
- 2) **Massa de água × energia de vaporização da água**
Considerando Energia de vaporização da água = 2454 kJ/kg
- 3) **Massa de vapor de água × calor específico do vapor de água × (T combustão - T evaporação);**
Considerando c_p vapor de água = 1912 J/kg/k; T evaporação = 100 °C

No processo de combustão das lamas é produzido vapor de água, que tal como a quantidade de ar, pode ser calculada através da equação 3. Esta equação prevê a produção de aproximadamente 0,72 quilogramas de água por cada quilograma de matéria volátil a incinerar, resultando num total de 3 638 quilogramas de água por dia produzidos na combustão das lamas. Na tabela seguinte apresentam-se as perdas relativas a esta produção de água no processo de degradação térmica.

Tabela 43 - Cálculo das perdas relativas à água produzida na combustão das lamas

Calor necessário para evaporar a água ⁻¹	8,9	GJ / d
Calor necessário para elevar a temperatura do vapor de água formado ⁻²	7,0	GJ / d

- 1) **Massa de água × energia de vaporização da água**
Considerando Energia de vaporização da água = 2454 kJ/kg
- 2) **Massa de vapor de água × calor específico do vapor de água × (T combustão - T evaporação);**
Considerando c_p vapor de água = 1912 J/kg/k; T evaporação = 100 °C

A energia disponível para produção de energia elétrica obtém-se através da subtração das perdas, apresentadas ao longo deste texto, ao PCS característico da matéria volátil nas lamas. Assim sendo, é de esperar a produção diária de 25,7 GJ na combustão das lamas.

8.4.4 Custos

A secagem térmica das lamas é da competência da ETAR, existindo a necessidade de contabilizar os custos de investimento para a implementação desta tecnologia e os custos de exploração associados às necessidades energéticas e à manutenção dos equipamentos.

A FCCA estima que os custos de investimento nos sistemas de secagem térmica das lamas variam entre 290 e 410 euros por tonelada de matéria seca anual (FCCA, 2000). Nesta simulação adotou-se o valor de 375 euros por tonelada de matéria seca anual, uma vez que a secagem das lamas com equipamentos mecânicos é uma tecnologia muito pouco utilizada em Portugal, o que tornaria os custos de investimento superiores à média esperada.

O principal encargo associado à exploração do sistema de secagem das lamas, utilizando o calor resultante da combustão do biogás numa caldeira, é a energia elétrica que não é produzida no sistema de cogeração. A FCCA estima que os custos de exploração específicos relativos aos sistemas de secagem variam entre 105 e 130 euros por tonelada de matéria seca a tratar (FCCA, 2000). Neste cenário opta-se pelo valor máximo deste intervalo, devido ao elevado impacto de não se vender energia elétrica à rede.

A distância definida entre a ETAR e a central de incineração é de 35 quilómetros e o transporte é realizado em camiões com uma capacidade de transporte de 20 toneladas, a um custo específico de 0,1 euros por tonelada de lama transportada e quilómetro percorrido.

Tal como a co-compostagem das lamas numa central de tratamento de RSU, o encaminhamento das lamas para incineração em conjunto com os resíduos não é uma prática comum em Portugal, não existindo valores práticos quanto à taxa a pagar à entidade gestora pela receção das lamas. A ERSAR define que os custos de exploração das incineradoras em funcionamento variam entre 25 e 15 euros por tonelada (ERSAR, 2010). A taxa definida para o encaminhamento das lamas para incineração é de 35 euros por tonelada.

Na tabela seguinte apresentam-se os custos associados a este cenário de destino final das lamas.

Tabela 44 - Custos relativos ao cenário 4

Custo de Investimento estimado para a secagem térmica das lamas ⁻¹	1.248.740	€
Custos exploração estimados para a secagem térmica das lamas ⁻²	432.897	€/ano
Número de viagens anuais para o transporte das lamas para incineração ⁻³	307	-
Custo anual de transporte ⁻⁴	21.490	€/ano
Custo anual a pagar à entidade responsável pela incineração dos RSU ⁻⁵	183.858	€/ano

-
- 1) $\text{Massa de matéria seca anual para incineração} \times \text{custo específico de investimento adotado}$
 - 2) $\text{Massa de matéria seca para incineração} \times \text{custo específico de exploração adotado}$
 - 3) $\text{Produção anual de lamas} \div \text{capacidade de transporte dos veículos}$
 - 4) $\text{Número de viagens anuais} \times \text{custo específico de transporte} \times \text{distância percorrida} \times \text{capacidade de transporte dos veículos}$
 - 5) $\text{Produção anual de lamas} \times \text{taxa a pagar à entidade responsável pela central de incineração}$

Da análise da tabela 44 observa-se que os custos de exploração do sistema de secagem térmica são elevados, o que em grande parte se deve ao facto de não se produzir eletricidade através do biogás produzido na digestão anaeróbia das lamas.

As lamas produzidas podem apresentar um poder calorífico mais elevado do que os resíduos que normalmente são recebidos na central de incineração, uma vez que apresentam teores de humidade inferiores a 50% e uma percentagem de sólidos voláteis consideráveis. Esta particularidade pode ser favorável para negociar, com a entidade gestora do sistema de incineração, taxas de receção das lamas mais competitivas em relação às restantes alternativas de destino final abordadas ao longo desta dissertação.

8.4.5 Emissões de GEE

O balanço energético relativo a este cenário começa por considerar a energia relativa à secagem térmica das lamas. Uma vez que não se necessita de recorrer a fontes de energia térmica externas, nesta fase considera-se apenas a energia elétrica que não é produzida através do biogás gerado na digestão anaeróbia das lamas, desprezando pequenas quantidades de energia elétrica que podem ser necessárias para o funcionamento dos equipamentos mecânicos de secagem das lamas.

Como já foi referido, o transporte das lamas da ETAR até à central de compostagem é efetuada em camiões com uma capacidade de 20 toneladas, percorrendo uma distância de 35 quilómetros.

A incineração das lamas é responsável pela produção de energia elétrica, assumindo-se nesta simulação uma eficiência de 30%. Por outro lado, estima-se um consumo de energia interna na central de incineração de 70 kW.h por tonelada de lama (McDougall, 2001).

Apesar de ser visto como uma opção de destino final, o processo de incineração é responsável pela produção de subprodutos que devem ter um destino final adequado. Destes subprodutos destacam-se as cinzas produzidas na fase de combustão e que representam 25% do peso dos resíduos incinerados (McDougall, 2001). Devido à elevada produção de cinzas, as centrais de incineração normalmente estão localizadas nas proximidades de aterros sanitários para os quais é feito o encaminhamento e deposição deste subproduto. Nesta simulação define-se que

o aterro para o qual se encaminham as cinzas produzidas está localizado a 10 quilômetros da central de incineração e que o transporte é realizado, mais uma vez, em caminhões com uma capacidade de 20 toneladas.

De seguida, são apresentados os resultados relativos ao balanço energético deste cenário, representando as emissões equivalentes de GEE.

Tabela 45 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao consumo de energia elétrica na secagem térmica das lamas

Consumo de energia real ⁻¹	9556,6	kW.h/d
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻²	3,087	t CO ₂ eq/d

- 1) Considerando a energia elétrica que não é produzida no processo de cogeração
- 2) Considerando um fator de emissão de 0,323 kg CO₂ eq / kW.h

Tabela 46 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte das lamas para a central de incineração

Distância percorrida	35	km
Quantidade de lamas transportadas	16,8	t/d
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻¹	0,147	t CO ₂ eq/d

- 1) Considerando um fator de emissão de 0,00025 t CO₂ eq / t.km

Tabela 47 - Emissões de CO₂ equivalente evitadas devido à produção de energia elétrica na incineração das lamas

Poder calorífico das lamas (contabilizando H ₂ O existente) ⁻¹	25,7	GJ/d
Energia elétrica produzida ⁻²	2137,9	kW.h/d
Consumo interno de energia ⁻³	1175,4	kW.h/d
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻⁴	0,311	t CO ₂ eq/d

- 1) Calculado no subcapítulo 8.4.3
- 2) Valor energético do biogás × eficiência de conversão; Considerando uma eficiência de 30 %
- 3) Considerando um consumo interno específico de 70 kW.h por tonelada de lama a incinerar
- 4) Considerando um fator de emissão de 0,323 kg CO₂ eq / kW.h

Tabela 48 - Emissões de CO₂ equivalente relativas ao transporte das cinzas para aterro sanitário

Distância percorrida	10	km
Produção de cinzas para aterro ⁻¹	4,20	t/d
Emissões de CO ₂ equivalente ⁻²	0,010	t CO ₂ eq/d

- 1) Considerando uma redução mássica na incineração das lamas de 75%
- 2) Considerando um fator de emissão de 0,00025 t CO₂ eq / t.km

Neste cenário as emissões relativas ao transporte das lamas são menos significativas, devido à considerável redução de volume na secagem térmica. O transporte das cinzas para deposição em aterro é desprezável, uma vez que os processos de incineração permitem uma elevada diminuição da massa inicial de lamas.

A diminuição das emissões de GEE, derivado da produção de energia elétrica na combustão das lamas, é consideravelmente mais reduzida do que o impacto da secagem térmica das lamas utilizando o calor resultante da combustão do biogás, o que tem forte impacto no valor de emissão de GEE relativo a este cenário.

9 Comparação dos cenários propostos

Neste capítulo é realizada uma comparação crítica dos cenários propostos para o destino final das lamas produzidas na ETAR em estudo. Esta análise considera aspetos económicos, ambientais e sociais, e tem o objetivo de estabelecer bases fortes para a aplicação desta metodologia a ETARs que estejam em situações distintas, a nível geográfico e nas características das lamas produzidas.

9.1 Custos

Os custos associados aos diferentes cenários já foram apresentados discriminadamente ao longo do capítulo anterior, sendo que nesta fase se apresenta o resultado global dos custos anuais para as diferentes opções de destino final propostas.

Os cenários apresentados representam soluções a curto/médio prazo para o destino final das lamas e são comparados tendo em conta as mesmas bases de cálculo, não se contabilizando por isso a atualização dos custos. De referir também que se considera um período de 15 anos para a amortização dos custos de investimento relativos à central de compostagem (cenário 3) e ao sistema de secagem térmica das lamas (cenário 4).

Na figura seguinte apresentam-se os valores dos custos anuais relativos aos quatro cenários de destino final das lamas.

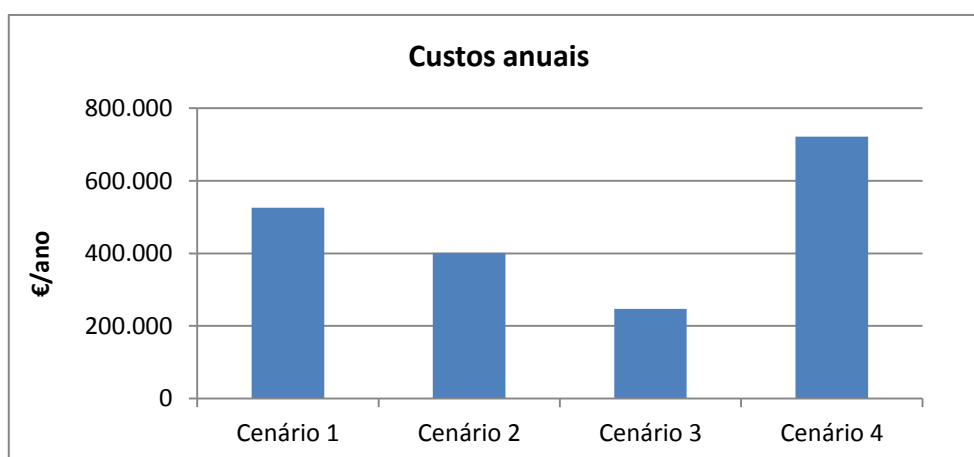


Figura 23 - Comparação dos custos totais nos diferentes cenários propostos

Da análise dos valores apresentados, observa-se que a opção de realizar a compostagem dedicada das lamas (cenário 3) pode representar uma alternativa bastante atrativa em termos económicos, em relação à contratação de serviços especializados para a valorização agrícola

das lamas (cenário 1), que atualmente representa a opção mais comum para o encaminhamento das lamas de ETARs.

A comercialização do composto produzido representa a principal razão para que o cenário 3 apresente os custos mais reduzidos, no entanto, assumiu-se que todo o composto era vendido a preço de mercado, premissa essa que depende da existência de mercado para este produto.

Este cenário tem também a desvantagem de requerer um elevado custo de investimento, o que desde logo representa uma dificuldade à implementação desta tecnologia, uma vez que em Portugal as condições de financiamento são cada vez mais rigorosas.

A utilização de infraestruturas já existentes para o tratamento biológico das lamas permite contornar os custos de investimento elevados. No cenário 2 estudou-se a opção de encaminhar as lamas para uma central de compostagem da fração orgânica dos RSU, obtendo-se resultados positivos. Na prática para além desta opção, pode ser estudada a hipótese de utilizar instalações de vermicompostagem ou centrais de valorização orgânica de resíduos indiferenciados, uma vez que nos últimos anos o número destas instalações tem vindo a crescer devido às metas estabelecidas para a redução dos resíduos que são enviados para aterro.

Para o tratamento das lamas em infraestruturas já existentes, é necessário que estas não estejam a trabalhar na capacidade máxima, que existam relações de proximidade entre as centrais de valorização e as ETARs e que os custos de exploração não sejam elevados, para que se consigam obter taxas competitivas neste tipo de gestão integrada. Estas taxas podem ser negociadas no caso de existirem possíveis relações de simbiose entre as ETARs e as entidades responsáveis pela gestão dos resíduos, tornando esta hipótese de recorrer a sistemas integrados para o tratamento conjunto dos RSU e das lamas uma alternativa ainda mais atrativa a nível económico.

O cenário 4 é a opção de valorização das lamas com os custos mais elevados, no entanto, é de referir que este cenário é visto como uma alternativa de destino final das lamas que não apresentam condições para serem encaminhadas para valorização agrícola ou compostagem, e que de outra forma seriam enviadas para aterro sanitário.

Os custos de investimento e exploração do sistema de secagem térmica das lamas representam os fatores mais significativos para os elevados valores relativos ao cenário 4. Para reduzir o impacto do processo de secagem pode-se recorrer a fontes alternativas de calor e à aceitação de lamas externas produzidas em ETARs situadas nas proximidades. A taxa específica para o encaminhamento das lamas para incineração tem também um impacto assinalável nos custos do cenário 4. Mais uma vez, nesta fase é importante encontrar

vantagens mútuas entre as entidades, que permitam reduzir a taxa de encaminhamento das lamas.

Os custos apresentados ao longo deste documento estão associados a elevados índices de incerteza e a variações temporais decorrentes das mudanças impostas nos mercados. Contudo, espera-se que os resultados obtidos, na comparação dos cenários propostos, se aproximem da realidade.

9.2 Emissões de GEE

Nesta fase são apresentados os valores das emissões de GEE nos diferentes cenários desenvolvidos. Tal como os custos, estas emissões foram apresentadas separadamente ao longo desta dissertação consoante as fases existentes nos diferentes cenários. As emissões apresentadas estão expressas em toneladas de CO₂ equivalente e têm apenas em consideração os consumos de energia nos diferentes cenários propostos para o destino final das lamas produzidas na ETAR em estudo.

Na figura seguinte são apresentados os valores totais das emissões de GEE nos cenários propostos, considerando a energia elétrica consumida e/ou produzida nos diferentes processos e a necessidade de transporte das lamas e dos subprodutos produzidos.

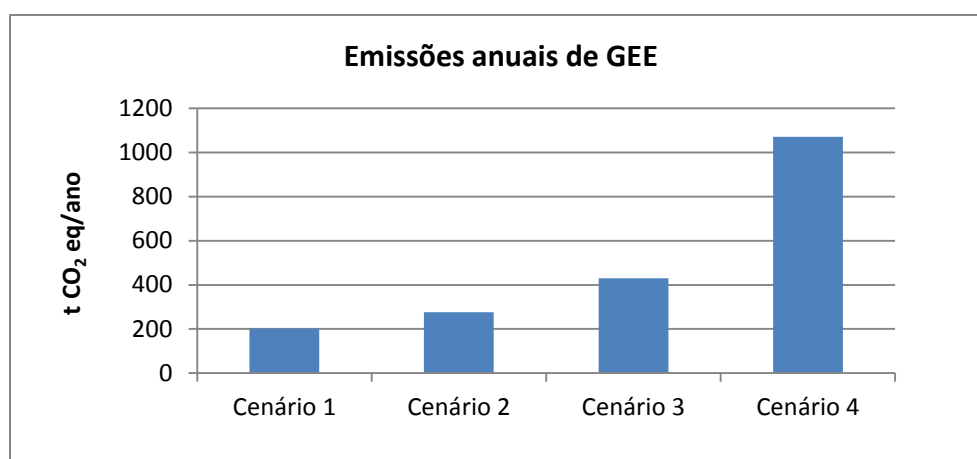


Figura 24 - Comparação das emissões de GEE nos diferentes cenários propostos

O cenário 1 representa a opção de destino final com consumos de energia mais reduzidos, consequência de ser um processo de encaminhamento simples, onde apenas as emissões relativas ao transporte das lamas, para os solos onde serão depositadas, constituem uma fonte de emissão significativa.

As emissões mais elevadas de GEE nos cenários 2 e 3 em relação ao cenário 1 devem-se essencialmente aos consumos de energia elétrica nas instalações onde se realizam a

compostagem das lamas. Estes consumos são difíceis de minimizar, uma vez que grande parte da energia é utilizada para o arejamento das lamas na fase de degradação ativa, o que é indispensável para garantir as condições ótimas do processo.

No cenário 3 as lamas são sujeitas a compostagem nas instalações da ETAR, não se necessitando de transporte para o seu encaminhamento. Por outro lado, a necessidade de material estruturante implica uma maior necessidade de transporte e arejamento do material a estabilizar, resultando assim em emissões de GEE mais elevadas em relação ao sistema integrado de compostagem de lamas numa central de valorização para o tratamento da fração orgânica dos RSU.

Apesar de se produzir energia elétrica na incineração das lamas, o cenário 4 representa a opção de destino final onde as emissões de GEE são mais elevadas. Estas emissões devem-se essencialmente à energia necessária para se efetuar a secagem térmica das lamas, uma vez que a opção de realizar a combustão do biogás numa caldeira implica não se produzir energia elétrica, o que permitiria reduzir as emissões de GEE através da substituição dos combustíveis fósseis.

A metodologia apresentada nesta fase é facilmente transposta para situações práticas, onde se pretende comparar o impacto ambiental de diferentes opções de tratamento e destino final de lamas nas ETARs. Nestes casos importa garantir a fiabilidade dos fatores de emissão utilizados e dos dados obtidos para esse cálculo, como o consumo de energia elétrica e os consumos específicos de combustíveis no transporte das lamas e dos subprodutos produzidos nos processos de tratamento da fase sólida.

9.3 Aceitação social

As opções de destino final de lamas estão sempre sujeitas à aceitação social por parte das populações, mesmo quando representam alternativas economicamente viáveis e com consumos de energia reduzidos. Neste subcapítulo, efetua-se uma breve descrição crítica dos diferentes cenários acerca do impacto social consequente da sua aplicação prática.

A contratação de serviços especializados para a valorização agrícola das lamas (cenário 1) é vista como um processo de reciclagem das propriedades materiais das lamas, no entanto, e apesar de existirem estudos que demonstram que esta prática tem impactos reduzidos no ambiente (quando bem aplicada), existe alguma oposição social por parte das populações próximas dos locais de deposição das lamas (síndrome NIMBY (*not in my back yard*), devido ao impacto psicológico de se utilizar na agricultura um subproduto resultante do tratamento de águas residuais (Águas, 2012). De referir também que apesar de ser uma prática que está

legislada, existe alguma falta de controlo no cumprimento desta legislação no que toca à valorização agrícola direta das lamas, permitindo que a oposição a esta alternativa de valorização se torne uma prática recorrente.

Por outro lado, os processos de compostagem (cenário 2 e 3) permitem melhorar as características das lamas, resultando assim numa maior aceitação social no que diz respeito à aplicação do composto produzido nos solos agrícolas. Outra das características que torna o processo de compostagem genericamente bem aceite por parte das populações, reside no facto de que o composto quando produzido em condições controladas pode possuir interessantes propriedades fertilizantes, diminuindo assim as necessidades de adição de fertilizantes químicos aos solos onde é aplicado.

Dos destinos finais propostos nos diferentes cenários apresentados, a incineração das lamas (cenário 4) é a alternativa que desperta menor aceitação social. Este facto deve-se essencialmente às emissões atmosféricas nocivas resultantes da combustão das lamas e à produção de subprodutos que devem ter destinos finais adequados, como as cinzas. No entanto, a popularidade dos processos de incineração tem vindo a subir, uma vez que, com este processo se permite a redução dos resíduos que são enviados para aterro, possibilitando também a produção de energia elétrica, contribuindo para a diminuição da dependência energética externa do País.

10 Conclusão

O destino final das lamas de ETARs é uma matéria que não reúne consenso científico e que está sujeito a condicionantes económicas, sociais e ambientais. Em Portugal, os destinos finais correntemente mais utilizados para o encaminhamento das lamas são a valorização agrícola e a deposição em aterro, existindo legislação específica para a regulamentação de cada uma das alternativas apresentadas. Apesar de não existirem em funcionamento processos de incineração de lamas, esta opção tem tido uma tendência crescente em alguns países, podendo vir a representar uma alternativa de destino final a curto/médio prazo.

A escolha do destino final deve ter em conta as tecnologias existentes na ETAR para o tratamento da fase líquida e da fase sólida, devendo-se adequar esse tratamento de forma a atingir as propriedades pretendidas das lamas em termos quantitativos e qualitativos.

A digestão anaeróbia tem a característica singular de produzir biogás, que pode ser aproveitado para a produção de energia. Esta particularidade pode tornar este processo sustentável em termos económicos e energéticos, possibilitando às ETARs reduzir a necessidade de recorrer a fontes externas de energia.

A contratação de serviços especializados para o encaminhamento das lamas para valorização agrícola é uma alternativa simples e com reduzidas emissões de GEE, onde importa apenas garantir o cumprimento das condições legais. Contudo, esta prática enfrenta alguma contestação social, podendo a compostagem representar uma solução para este problema.

A compostagem permite melhorar as características das lamas, produzindo-se um composto higienizado e com um interessante poder fertilizante. Este processo de estabilização biológica pode apresentar vantagens a nível económico, principalmente em caso de sucesso na comercialização do composto. A energia necessária para a compostagem é responsável por aumentar as emissões de GEE associada a esta opção de destino final de lamas.

A incineração das lamas, numa central de valorização energética de RSU, apresenta valores mais elevados nos custos e nas emissões de GEE em relação às restantes alternativas abordadas nesta dissertação. No entanto, esta alternativa apresenta-se como uma solução de destino final para as lamas que não tenham condições para valorização agrícola. Esta opção de eliminação térmica das lamas tem algumas consequências penosas para o ambiente, que devem ser minimizadas, como as emissões gasosas e a formação de subprodutos indesejáveis. Estas particularidades contribuem para que o processo de incineração não tenha uma aceitação social generalizada, o que pode condicionar a aplicação desta opção no tratamento de lamas produzidas em ETARs.

Os sistemas de desidratação não atingem valores de concentração de sólidos suficientemente altos para que se consiga incinerar as lamas sem a utilização de um combustível auxiliar. Uma solução passa pela utilização de sistemas de secagem térmica das lamas. Estes processos permitem atingir níveis de humidade nas lamas muito reduzidos, no entanto, exigem um consumo de energia muito elevado, o que explica a pouca utilização destes sistemas no tratamento de lamas produzidas nas ETARs nacionais.

O tratamento das lamas em infraestruturas já existentes pode-se revelar uma alternativa de valorização interessante para as entidades envolvidas. Contudo a implementação de sistemas integrados está dependente da existência de centrais de valorização nas proximidades da ETAR onde as lamas são produzidas.

Dos resultados apresentados ao longo desta dissertação, conclui-se que a melhor opção para a valorização das lamas depende das seguintes condicionantes:

- Processos utilizados na ETAR no tratamento da fase líquida e da fase sólida;
- Características e quantidade de lamas produzidas;
- Existência de espaço para a implementação de tecnologias de tratamento de lamas;
- Políticas energéticas do País e da entidade responsável pela gestão da ETAR;
- Existência de centrais de valorização nas proximidades;
- Aceitabilidade social por parte da população;
- Fatores económicos;
- Fatores ambientais.

A metodologia apresentada pode ser utilizada, em casos reais, na escolha do destino final mais adequado das lamas produzidas numa ETAR. Neste caso devem ser tidos em conta os parâmetros enumerados no parágrafo anterior. De referir que em casos práticos é possível ter valores relativos aos custos e aos fatores de emissão de GEE mais credíveis e ajustados à realidade presente.

A realização desta dissertação procurou estudar soluções para o destino final das lamas a curto-prazo, no entanto, algumas das alternativas apresentadas tem desde logo o objetivo de acompanhar a evolução deste tema, nos próximos anos, a nível tecnológico e normativo.

As análises comparativas estão sujeitas a fatores de incerteza, dos quais se destacam os custos associados às diferentes fases de tratamento, transporte e destino final das lamas. Estes custos estão dependentes de várias condicionantes, representando um dos principais obstáculos ao longo do trabalho desenvolvido.

Referências Bibliográficas

Águas, P., (2012) - O NIMBY chegou à agricultura, ...ou sempre cá esteve. 1º Ciclo de Conferências. Conselho Técnico-Científico. Edições Instituto Superior de Castelo Branco.

Águas de Gaia - acedido em 12 de junho de 2013

<http://www.aguasgaia.eu/pt>

Andritz - Acedido em 15 de junho de 2013

<http://www.andritz.com>

APA (Agência Portuguesa do Ambiente), (1980) - Carta de acidez e alcalinidade dos solos. Atlas do Ambiente Digital.

ASTEE, (2009) - Guide méthodologique d'évaluation des émissions de Gaz à Effet de Serre des services de l'eau et de l'assainissement.

Bioblog - Acedido em 18 de junho de 2013

<http://gracebioblog.blogspot.pt/>

Candeias, M., (2008) - Gestão de Lamas de Depuração. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Social.

Carvalho, A., (2010) - Estudo integrado para transporte tratamento valorização e destino final das lamas produzidas na ETAR de Sobreiras, na ETAR do Freixo. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Cheng, C., (2010) - Tratamento Físico-Químico de Lamas. Apontamentos da disciplina de Tecnologias e Sistemas de Tratamento de Águas I. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

City of Edmonton - Acedido em 20 de junho de 2013

<http://www.edmonton.ca>

Costa, M. Ferreira, M., (2002) - Utilização Agrícola de Lamas de ETAR, Guia Técnico nº 103. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pesca.

Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de junho, Diário da Republica nº 116, Série I, (pp.3251-3300).

Decreto-Lei nº 85/2005, de 28 de abril, Diário da Republica nº 82, Série I-A, (pp.3214-3234).

Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de agosto, Diário da Republica nº 153, Série I, (pp.5170-5198).

Decreto-Lei nº 276/2009, de 2 de outubro, Diário da Republica nº 192, Série I, (pp.7154-7165).

Degrémont - Acedido em 15 de junho de 2013

<http://www.degremont.com>

DMC Contracting - Acedido em 11 de junho de 2013

<http://dmcontracting.com.au/sewertreatmentplants.html>

EDP (Energias de Portugal), (2013) - Relatório e Contas de 2012

EEA (European Environmental Agency), (1997) - Sludge Treatment and Disposal, Management Approaches and Experiences. Copenhagen

EEA (European Environmental Agency), (2001) - Environmental Signals environmental assessment report. N.º 8. Luxemburgo.

EPA (Environmental Protection Agency), (1979) - Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal. Cincinnati

Epstein, E., (1997) - The Science of Composting. Technomic Publishing Company. Lancaster.

ERSAR, (2010) - Opções de Gestão de Resíduos Urbanos, Lisboa.

EC (European Commission), (2001) - Disposal and recycling routes for sewage sludge. Luxemburgo.

Eurostat - Acedido em 9 de maio de 2013

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

Florindo, F., (2009) - Caracterização das Lamas Geradas e a sua Valorização nos Subistemas dos SMAS-Sintra. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa.

FCCA, (2000) - Análisis de la Situación y Posible Evolución de las Tecnologías para el Tratamiento de Lodos de Depuración.

Haug, T., (1993) - The Practical Handbook of Compost Engineering. Torrance: Lewis Publishers.

Huber - Acedido em 15 de junho de 2013

<http://www.huber.de>

Klock, U., Muñiz, G., Hernandez, j., Andrade, A., (2005) - Química da Madeira. 3ª edição. Universidade Federal do Paraná, Sector de Ciências Agrárias. Curitiba

Levy, Q., Cabeças, J., (2006) - Resíduos sólidos urbanos : princípios e processos. Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente, cop. Lisboa.

Lifecarbontool; Degrémont - Acedido em 5 de abril de 2013

<http://www.lifecarbontool.com>

Lipor - Acedido em 10 de junho de 2013

<http://www.lipor.pt>

Lourenço, L., (2010) - Vermicompostagem - Gestão de Resíduos Orgânicos. FUTURAMB

McDougall, F., (2001) - Integrated solid waste management: a life cycle inventory. 2nd Edition, Blackwell Science, cop. London.

Mendes, A., (2009) - Estudo Técnico-Económico de uma Unidade de Co-Compostagem de lamas de ETAR. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Metcalf & Eddy, (1991) - Wastewater Engineering - Treatment, Disposal and Reuse. 3rd Edition, McGraw-Hill. New York.

Milieu, WRc e RPA, (2008) - Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Milieu Ltd. Bélgica.

Pita, F., (2002) - Tratamento de Águas Residuais Domésticas. Apontamentos da disciplina de Armazenamento e Tratamento de Resíduos. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Rego, R., (2012) - Análise de Desempenho de Estações de Tratamento de Águas Residuais recorrendo a um Modelo de Metabolismo Tese de Mestrado - Instituto Superior Técnico.

Rulkens, W., (2008) - Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options. Energy & Fuels, 22, 9-15.

Santos, C., (2012) - Secagem e Co-combustão de Lamas em Leito Fluidizado. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro.

Secil, (2010) - Valorização Energética de Lamas de ETAR nos Fornos de Cimento. APDA Seminário: O Mercado das Lamas de ETAR e Entidades Gestoras, Lisboa.

Simão, S., (2011) - Valorização Energética de Lamas Resultantes do Processo de Produção de Pasta e Papel numa Caldeira de Leito Fluidizado. Tese de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa.

SIMARSUL - acedido em 13 de junho de 2013

<http://www.simarsul.pt>

SMEAS Maia - acedido em 12 de junho de 2013

<http://www.smeas-maia.pt>

Simões, C., Rosmaninho I., Henriques A. G., (2008) - Guia para a Avaliação de Impacte Ambiental de Estações de Tratamento de Águas Residuais. Agência Portuguesa do Ambiente. Amadora.

Sousa, R., (2005) - Estratégias de Gestão de Lamas das Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR). Extrusão de lamas para aplicação na agricultura. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

STOWA, (2010) - News: The Dutch Roadmap for WWTP of 2030. Holanda.

VCSTAR - Acedido em 18 de junho de 2013

<http://www.vcstar.com>